

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA  
PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**IMPLICACIONES AMBIENTALES Y AGRONÓMICAS DE LA FERTILIZACIÓN  
ORGÁNICA Y MINERAL EN EL CULTIVO DE HORTALIZAS EN INVERNADERO**

**PRESENTA:**

**ANA LOURDES RODRÍGUEZ VILLANUEVA**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. GISELA AGUILAR BENÍTEZ**

**CODIRECTOR:**

**DR. RIGOBERTO CASTRO RIVERA**

**ASESORA:**

**DRA. PAOLA ELIZABETH DÍAZ FLORES**

**11 DE FEBRERO DE 2026**

## **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

### **PROYECTO REALIZADO EN:**

- Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí
  - Laboratorio de Nutrición Animal del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí
  - Laboratorio de Síntesis de Materiales Verdes de la Facultad de Ciencias Químicas de San Luis Potosí
  - Laboratorio de Integración Planta-Microorganismo de la Facultad de Agronomía y Veterinaria

### **CON FINANCIAMIENTO DE:**

**Instituto Politécnico Nacional**

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**“Rendimiento de gramíneas a diferentes estrategias de defoliación y fertilización orgánico-mineral” SIP 20230303 y SIP 20240617**

**AGRADEZCO A SECIHTI EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS**

**Becario No. 1308276**

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

IMPLICACIONES AMBIENTALES Y AGRONÓMICAS DE LA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA Y MINERAL EN EL CULTIVO DE HORTALIZAS EN INVERNADERO. © 2025 by Ana Lourdes

Rodríguez Villanueva is licensed under [Creative Commons Attribution-NonCommercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

[ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

## Agradecimientos

A mi familia por su motivación y apoyo en todo momento. Gracias Mago, por estar ahí cada que lo necesité y por demostrarme que siempre hay otra opción para resolver cualquier situación que se presente. Gracias Azul, por tu paciencia y ayudarme muchas veces con el riego de los cultivos. Gracias Ari, por aguantar todas esas horas de trabajo dentro del invernadero y llegar justo en el momento indicado.

A mis padres por su amor incondicional y apoyo en cada etapa de mi vida y por alentarme a ser una mejor persona. Gracias mamá, por todo tu amor. Gracias papá, por tus sabios consejos.

A mis hermanos, por siempre estar pendientes de mí. Gracias por sus buenos deseos, por cada plática y cada momento compartido.

A la Dra. Gisela Aguilar Benítez, mi Directora de tesis, por su tiempo, paciencia, experiencia y el espacio que me brindó para realizar este trabajo. Agradezco su invaluable guía y enseñanza.

A la Dra. Paola Elizabeth Díaz Flores por permitirme el uso de sus equipos en su laboratorio y por su interés en la realización de este trabajo de investigación.

Al Dr. Rigoberto Rivera Castro por sus aportaciones y disposición para resolver mis dudas; así como el financiamiento del proyecto.

A la QFB María Eugenia Reyna Ortega por su apoyo técnico brindado en la utilización de los equipos para el análisis de suelos y su apoyo dentro del invernadero. Gracias Maru, por tu calidad humana, tu escucha sincera y tu apoyo constante que hicieron este trabajo de investigación más significativo.

## INDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	16
Abstract.....	18
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	20
2. LA AGRICULTURA Y SU RELACIÓN CON LOS NITRATOS EN EL SUELO.....	18
3. HIPÓTESIS.....	21
4. OBJETIVOS.....	21
4.1 Objetivo General.....	21
4.2 Objetivos específicos.....	21
5. LITERATURA CITADA.....	22
Capítulo 1. Contenido de nitratos, reacciones fisiológicas y rendimiento en cultivo de lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> L.) con gestión racional de fertilizantes nitrogenados.....	29
1.1 Introducción.....	29
1.2 Materiales y métodos.....	31
Caracterización de suelo y agua.....	33
Manejo del cultivo.....	33
Variables determinadas en el cultivo de lechuga.....	35
Análisis estadístico.....	40
1.3 Resultados y discusión.....	40
1.4 Conclusiones.....	70
1.5 Literatura citada.....	71
Capítulo 2. Efecto de la fertilización integral en reacciones fisiológicas, rendimiento, contenido de nitratos y calidad de futo de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	77
2.1 Introducción.....	77
2.2 Materiales y Métodos.....	81
Caracterización de suelo y agua.....	82
Manejo del cultivo.....	83
Variables determinadas en el cultivo de jitomate.....	86
Análisis Estadístico.....	91
2.3 Resultados y discusión.....	92
2.4 Conclusiones.....	118
2.5 Literatura citada.....	119
Conclusiones generales.....	132

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo global de fertilizantes minerales .....	21
Figura 2. Principales procesos del ciclo del nitrógeno en sistemas agrícolas .....	21
Figura 3. Volumen de producción nacional de lechuga en miles de toneladas .....	29
Figura 4. Lechuga .....	30
Figura 5. Invernadero utilizado para el establecimiento del cultivo de lechuga .....	32
Figura 6. Unidad experimental del cultivo de lechuga .....	32
Figura 7. Suelo agrícola de parcela en descanso (A) en el sitio, (B) homogeneizado para el cultivo de lechuga .....	33
Figura 8. Plantas de lechuga a los 15 días (A), 30 días (B) y 45 días (C) ddt .....	35
Figura 9. Equipos utilizados en la medición de variables fisiológicas del cultivo de lechuga. (A) contenido de clorofila, (B) conductancia estomática, (C) eficiencia fotosintética y (D) contenido de nitratos .....	37
Figura 10. Equipo utilizado en la medición de conductividad eléctrica en suelo durante el cultivo de lechuga .....	39
Figura 11. Realización de los análisis del suelo después de la cosecha .....	39
Figura 12. Contenido de clorofila en tejido foliar de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	46
Figura 13. Conductancia estomática en tejido foliar de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	49
Figura 14. Eficiencia fotosintética en tejido foliar de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	52
Figura 15. Contenido de nitratos en savia del cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	55
Figura 16. Variables de rendimiento del cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. (A) peso fresco y (B) diámetro ecuatorial. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	59
Figura 17. pH (A) y conductividad eléctrica (B) del suelo del cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	63

Figura 18. Parámetros físicos y químicos del suelo al final del ciclo de cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Densidad aparente (A), materia orgánica (B), pH (C) y conductividad eléctrica (D). Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	66
Figura 19. Contenido de nitratos en el suelo al final del ciclo de cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	68
Figura 20. Volumen de producción nacional de jitomate en miles de toneladas .....	77
Figura 21. Jitomate .....	79
Figura 22. Invernadero utilizado para el establecimiento del cultivo de jitomate .....	81
Figura 23. Unidad experimental del cultivo de jitomate.....	82
Figura 24. Suelo agrícola de parcela en descanso (A) en el sitio, (B) homogeneizado para el cultivo de jitomate .....	82
Figura 25. Ubicación de trampas dentro del invernadero y desarrollo del cultivo.....	85
Figura 26. Insectos encontrados en algunas plantas de jitomate .....	85
Figura 27. Frutos de jitomate listos para cosechar .....	86
Figura 28. Equipos utilizados en la medición de variables fisiológicas del cultivo de jitomate. (A) contenido de clorofila, (B) conductancia estomática, (C) eficiencia fotosintética y (D) contenido de nitratos .....	88
Figura 29. Equipo utilizado en la medición de conductividad eléctrica en suelo durante el cultivo de jitomate.....	90
Figura 30. Medición de variables de rendimiento y calidad en el fruto de jitomate después de la cosecha. (A) peso fresco, (B) diámetro ecuatorial, (C) ° Brix, (D) vista interna y (E) contenido de nitratos .....	90
Figura 31. Determinación de textura, CE y materia orgánica del suelo después de la cosecha.....	91
Figura 32. Contenido de clorofila en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	96
Figura 33. Conductancia estomática en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	99
Figura 34. Eficiencia fotosintética en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	101
Figura 35. Contenido de nitratos en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de	

temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	104
Figura 36. Número de frutos por racimo del cultivo de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	107
Figura 37. Contenido de nitratos en fruto del cultivo de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	109
Figura 38. pH (A) y conductividad eléctrica (B) del cultivo de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media. ....	113

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos de fertilización orgánica y mineral en cultivo de lechuga y cantidad de fertilizante aplicado (g) .....	34
Tabla 2. Variables, equipo y periodicidad de medición en planta de lechuga .....	36
Tabla 3. Variables, equipo y periodicidad de medición en suelo.....	38
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del suelo y agua de riego .....	40
Tabla 5. Condiciones experimentales dentro del invernadero durante el ciclo de cultivo de lechuga .....	42
Tabla 6. Contenido de clorofila ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	44
Tabla 7. Contenido de clorofila ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	45
Tabla 8. Conductancia estomática (gs) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	47
Tabla 9. Conductancia estomática (gs) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	48
Tabla 10. Eficiencia fotosintética ( $F_v/F_m$ ) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	51
Tabla 11. Eficiencia fotosintética ( $F_v/F_m$ ) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	51
Tabla 12. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	54
Tabla 13. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	54

Tabla 14. Variables de rendimiento del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	57
Tabla 15. Variables de rendimiento del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. .	58
Tabla 16. pH en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	61
Tabla 17. pH en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. .	61
Tabla 18. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ...	62
Tabla 19. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	63
Tabla 20. Parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	64
Tabla 21. Parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	65
Tabla 22. Contrastes ortogonales realizados para evaluar el efecto de los tratamientos sobre diferentes variables en el cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. ....	69
Tabla 23. Tratamientos de fertilización orgánica y mineral en cultivo de jitomate y cantidad de fertilizante aplicado (g) .....	84
Tabla 24. Variables, equipo y periodicidad de medición en planta de jitomate .....	87
Tabla 25. Variables, equipo y periodicidad de medición en suelo .....	89
Tabla 26. Condiciones experimentales dentro del invernadero durante el ciclo de cultivo de jitomate. ....	93
Tabla 27. Contenido de clorofila (mg/m <sup>2</sup> ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	94
Tabla 28. Contenido de clorofila (mg/m <sup>2</sup> ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico	

tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	95
Tabla 29. Conductancia estomática ( $g_s$ ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	98
Tabla 30. Conductancia estomática ( $g_s$ ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	98
Tabla 31. Eficiencia fotosintética ( $F_v/F_m$ ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	100
Tabla 32. Eficiencia fotosintética ( $F_v/F_m$ ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	101
Tabla 33. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	102
Tabla 34. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	103
Tabla 35. Variables de rendimiento del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	106
Tabla 36. Variables de rendimiento del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	106
Tabla 37. Variables de calidad del fruto de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	110
Tabla 38. Variables de calidad del fruto de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....	110
Tabla 39. pH en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ....	111

Tabla 40. pH en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. 111	111
Tabla 41. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey. ..112	112
Tabla 42. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher. ....113	113
Tabla 43. Variables de parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.....115	115
Tabla 44. Variables de parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.....116	116
Tabla 45. Contrastes ortogonales realizados para evaluar el efecto de los tratamientos sobre diferentes variables en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. ....117	117

## Resumen

Alrededor del 12% de la superficie terrestre mundial se destina a la producción de alimentos bajo diversos sistemas. En México, el sistema de agricultura protegida permite rendimientos hasta 500 % superiores a lo obtenido en cielo abierto en cultivos como jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.). Sin embargo, esta productividad se asocia a riesgos ambientales y pérdida de calidad del suelo, por un alto uso de insumos, destacando los fertilizantes nitrogenados. En la literatura especializada se plantea que, la aplicación excesiva e inadecuada de nitratos en la agricultura protegida conlleva a riesgos por eutroficación, bioacumulación en tejidos vegetales que provoca problemas de salud humana, y salinización del suelo; lo que compromete a los objetivos 3, 6 y 12 de desarrollo sostenible. Con base en este contexto, se planteó analizar los efectos de la reducción de fertilización nitrogenada en el rendimiento de lechuga y jitomate, y contenido de nitratos en tejido vegetal y suelo. En un invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, se establecieron experimentos independientes con cultivo de lechuga y jitomate en macetas. Bajo un diseño completamente al azar, se evaluaron siete tratamientos de fertilización (con dosis de fertilizantes minerales y orgánicos de 100 % hasta 0 %), con siete repeticiones de cada uno. Se midió contenido de clorofila, eficiencia fotosintética y contenido de nitratos en planta. Se registró el rendimiento agronómico y se determinaron pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y nitratos en suelo. Los efectos de los tratamientos se analizaron mediante análisis de varianza, pruebas de comparación de medias de Tukey y diferencia mínima significativa (LSD). Para las variables evaluadas a lo largo del tiempo se emplearon análisis de medidas repetidas y contrastes ortogonales. En el cultivo de lechuga se encontró que, las diferencias en la acumulación de nitratos en savia no estuvieron relacionadas solo con los tratamientos, sino también con altas temperaturas registradas (hasta 54.3 °C) y baja humedad disponible en el sustrato. El contenido promedio de clorofila solo tuvo diferencia significativa entre los tratamientos extremos 100 % de fertilización mineral (306.64 mg/m<sup>2</sup>) y 100 % de fertilización orgánica (267.5 mg/m<sup>2</sup>). El diámetro ecuatorial no se afectó por los tratamientos, pero el mayor peso se obtuvo con el tratamiento 100

% mineral (155.64 g/planta), sin una tendencia por tratamientos. El registro de nitratos en suelo no evidenció una tendencia, pero el menor contenido se obtuvo con el tratamiento 100 % mineral. La proporción 85/15 (mineral/orgánico) se considera la más adecuada porque se obtuvo el menor contenido de nitratos en savia (2550 ppm) y el peso fue similar al obtenido con 100 % de fertilización mineral (145.56 g); manteniendo niveles adecuados de sales (1.1 dS/m), materia orgánica (2.23 %) y nitratos (180 ppm) en el suelo. En el cultivo de jitomate, el contenido de clorofila promedio fue significativamente menor con 100 % de fertilización orgánica (295.39 mg/m<sup>2</sup>) comparado al 100 % de fertilización mineral (410.82 mg/m<sup>2</sup>). Respecto al contenido promedio de nitratos en savia, se registró un rango entre 1961 y 2633 ppm con diferencias significativas, sin identificar una correlación entre niveles del tratamiento y esta variable. El mayor número de frutos se obtuvo con la fertilización totalmente mineral, aunque los frutos con mayor peso se produjeron con los tratamientos de 5 y 15 % de fertilización orgánica. Los grados brix en fruto no presentaron cambios significativos. El mayor contenido de nitratos en fruto se registró con el tratamiento 100 % mineral (423.73 ppm); mientras que, al reducir esta fuente a 75 % se obtuvo la menor concentración (273.46 ppm). El valor más alto de nitratos en suelo se obtuvo en el tratamiento con fertilización 100 % orgánica (483.33 ppm) en comparación con 203 ppm de la proporción 80/20 (mineral/orgánica). La materia orgánica cambió significativamente sin una tendencia por tratamiento, observándose el valor más alto en la proporción 90/10 (mineral/orgánica). El tratamiento 80/20 (mineral/orgánica) permitió rendimiento similar (1.4 kg/planta) y mejor calidad de fruto, conservando niveles adecuados de sales (0.81 dS/m), materia orgánica (7.12 %) y nitratos (203.33 ppm) en suelo, respecto a los tratamientos 100 % mineral y 100 % orgánico. Se identificó que la sustitución parcial de fertilización mineral por orgánica permite buenos rendimientos, mejor calidad de alimentos y mejora o mantiene en niveles adecuados las propiedades físicas y químicas del suelo. A pesar de lo anterior, no se evidenció una tendencia entre los tratamientos y los niveles de nitratos en el sistema suelo-planta, lo que revela la complejidad de su dinámica y la estrecha relación con las condiciones ambientales y el ciclo y manejo del cultivo.

**Palabras clave:** *Agricultura protegida, nitratos, fertilizantes, eutroficación, suelo.*

## Abstract

Around 12% of the world's land area is used for food production under various systems. In Mexico, protected agriculture systems allow yields up to 500% higher than those obtained in open fields for crops such as tomatoes (*Solanum lycopersicum L.*) and lettuce (*Lactuca sativa L.*). However, this productivity is associated with environmental risks and loss of soil quality due to high use of inputs, particularly nitrogen fertilizers. The specialized literature suggests that the excessive and inappropriate application of nitrates in protected agriculture leads to risks of eutrophication, bioaccumulation in plant foods that causes human health problems, and soil salinization, which compromises sustainable development goals 3, 6, and 12. Based on this context, we set out to analyze the effect of reducing nitrogen fertilization on lettuce and tomato yields and nitrate content in plant tissue and soil. In a plastic tunnel greenhouse without temperature and humidity control, independent experiments were set up with lettuce and tomato crops in pots. Under a completely randomized design, seven fertilization treatments (with mineral and organic fertilizer doses ranging from 100% to 0%) were evaluated, with seven replicates of each. Chlorophyll content, photosynthetic efficiency, and nitrate content in plants were measured. Agronomic yield was recorded, and soil pH, electrical conductivity, organic matter, and nitrate content were determined. The effects of the treatments were analyzed using analysis of variance, Tukey's mean comparison tests, and least significant difference (LSD). Repeated measures analysis and orthogonal contrasts were used for the variables evaluated over time. The results showed that, in lettuce, the differences observed in nitrate accumulation in sap were not only related to the treatments but also to experimental conditions such as high temperatures (up to 54.3 °C) and low substrate moisture, which, according to the literature, are factors that modify enzyme activity. The average chlorophyll content only showed a significant difference between the extreme treatments of 100% mineral fertilization (306.64 mg/m<sup>2</sup>) and 100% organic fertilization (267.5 mg/m<sup>2</sup>). The equatorial diameter was not affected by the treatments, but the yield was higher with the 100% mineral treatment (22.23 g/plant), with no trend for treatments. The soil nitrate record did not show a trend, but the lowest content was obtained with the 100% mineral

treatment. The 85/15 (mineral/organic) ratio is considered the most appropriate because it resulted in the lowest nitrate content in sap (2550 ppm) and the yield was similar to that obtained with 100% mineral fertilization, maintaining adequate levels of salts (1.1 dS/m), organic matter (2.23%), and nitrates (180 ppm) in the soil. In tomato cultivation, the average chlorophyll content was significantly lower with 100% organic fertilization (295.39 mg/m<sup>2</sup>) compared to 100% mineral fertilization (410.82 mg/m<sup>2</sup>). Regarding the average nitrate content in sap, a range between 1961 and 2633 ppm was recorded with significant differences, without identifying a correlation between treatment levels and this variable. The highest number of fruits was obtained with total mineral fertilization, although the heaviest fruits were produced with the 5 and 15% organic fertilization treatments. There were no significant changes in the Brix degrees of the fruit. The highest nitrate content in the fruit was recorded with the 100% mineral treatment (423.73 ppm), while reducing this source to 75% resulted in the lowest concentration. The highest nitrate value in the soil was obtained in the treatment with 100% organic fertilization (483.33 ppm) compared to 203 ppm in the 80/20 (mineral/organic) ratio. Organic matter changed significantly without a trend by treatment, with the highest value observed in the 90/10 (mineral/organic) ratio. The treatment with 80% mineral fertilization and 20% organic fertilization allowed for similar yield (1.4 kg/plant) and better fruit quality, maintaining adequate levels of salts (0.81 dS/m), organic matter (7.12%), and nitrates (203.33 ppm) in the soil, compared to the 100% mineral and 100% organic treatments. Considering the environmental and agronomic implications, it was found that partially replacing mineral fertilizers with organic fertilizers allows for good yields, better food quality, and improves or maintains the physical and chemical properties of the soil at adequate levels. Despite this, no trend was observed between the treatments and nitrate levels in the soil-plant system, revealing the complexity of its dynamics and the close relationship with environmental conditions and crop management.

**Keywords:** *Protected agriculture, nitrates, fertilizers, eutrophication, soil.*

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los sistemas de producción agrícola se han intensificado para aumentar su productividad. Durante el período de 1961 a 2019, la producción de cultivos creció un 250%, las tierras de cultivo se expandieron un 15% y el uso de fertilizantes minerales aumentó en 800% (Lassaletta, 2019). Abastecer de alimentos a una población creciente sin daños ambientales irreversibles es uno de los principales desafíos a los que actualmente se enfrentan los sistemas de cultivo, pues la superficie de tierra mundial es de 13 200 millones de hectáreas, de las cuales el 12% se dedica a la producción de aproximadamente el 95% de los alimentos que se consumen en el mundo (FAOSTAT, 2021). Esta productividad depende en gran medida de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, característica determinante para la productividad natural y agrícola en los ecosistemas terrestres; en donde la mayor limitante es la disponibilidad de nitrógeno (Udvardi *et al.*, 2021; Wall, 2021).

Follet y Hatfield (2001) señalan que el nitrógeno es un elemento y componente central de las proteínas y aminoácidos en la dieta humana, además de ser uno de los macronutrientes esenciales que las plantas necesitan para desarrollar sus estructuras y funciones vitales. Desempeña una función esencial en la síntesis de clorofila, participando activamente en las moléculas que forman parte del proceso fotosintético, favoreciendo la división celular, el alargamiento radicular y el desarrollo del área foliar como lo mencionan Vargas *et al.* (2022); por lo que su disponibilidad ha sido el principal impulsor de la mejora del rendimiento de los cultivos (Wang & Li, 2019). A pesar de que el nitrógeno representa el 78% de la atmósfera en forma de gas ( $N_2$ ), de acuerdo con los mismos autores, no está directamente disponible para la absorción y metabolismo de las plantas; éstas pueden obtenerlo a través del suelo por absorción en forma de nitrato ( $NO_3^-$ ) o amonio ( $NH_4^+$ ) para ayudarlas a crecer y desarrollarse óptimamente (Azcón & Talón, 2013). En particular, los nitratos son compuestos esenciales en la nutrición vegetal y compuestos altamente móviles y solubles que, si no son interceptados y absorbidos por las raíces de las plantas, se filtran fácilmente en el suelo junto con el agua de riego o de lluvia, o arrastrado por la escorrentía generando su lixiviación (Savci, 2012). Esta lixiviación de nitratos puede tener

impactos ambientales negativos significativos como (i) la contaminación y eutrofización de aguas subterráneas y superficiales superando los límites permisibles en agua para el consumo humano, que ponen en riesgo la salud humana al provocar metahemoglobinemia y formar compuestos cancerígenos como las nitrosaminas (Salehzadeh *et al.*, 2020); (ii) la degradación del suelo afectando la actividad de microorganismos benéficos y deteriorando su estructura; y (iii) la contaminación del aire por la emisión de gases contaminantes que contribuyen a la lluvia ácida y al efecto invernadero (Rao & Puttanna, 2000).

El aumento en la concentración de nitratos se debe principalmente a la aplicación de fertilizantes minerales nitrogenados en los suelos agrícolas en cantidades por encima de lo requerido y han sido objeto de creciente preocupación debido a su incorporación indiscriminada (Etchevers *et al.*, 2016). El nitrógeno que no es aprovechado por las plantas (nitrógeno reactivo) regresa a la atmósfera en diferentes formas (Sánchez, 2024) como óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), un gas responsable de provocar el calentamiento global. (Romero & Suárez, 2017).

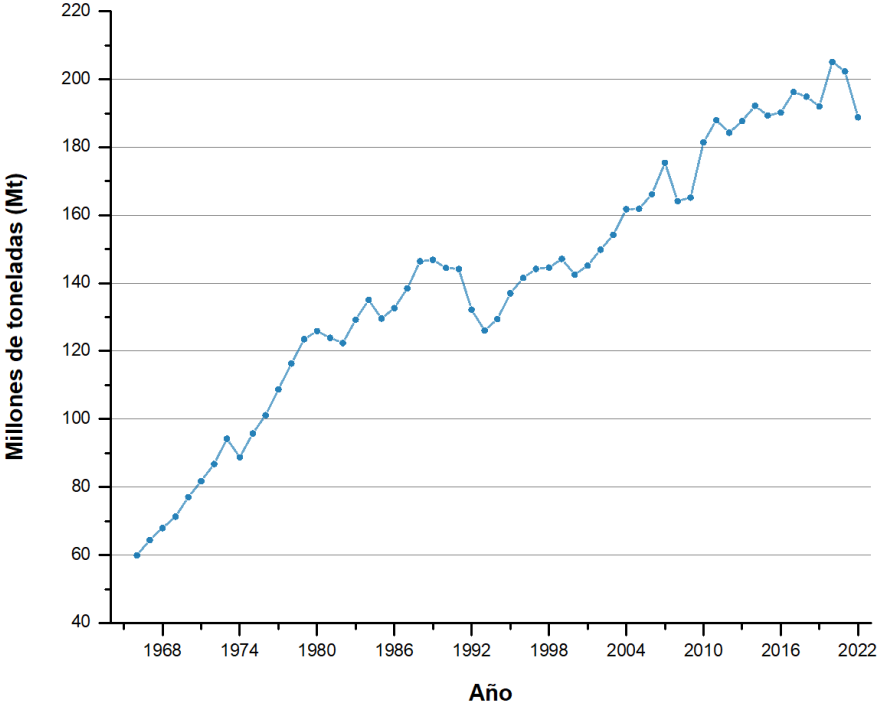


Figura 1. Consumo global de fertilizantes minerales

Elaboración propia a partir de datos tomados de *Fertilizer consumption*, por FAOSTAT, 2025, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS?end=1995&start=1975>

Con respecto a los fertilizantes, la figura 1 muestra el aumento de la tendencia mundial en su uso, pues en los años 1961, 1981, 2001 y 2022 se registraron 31, 115, 137, 195 millones de toneladas respectivamente (FAOSTAT, 2023). Según la misma fuente, los fertilizantes nitrogenados son los más usados, con un 56% del volumen total.

En referencia al consumo de fertilizantes en México, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura reporta que, entre los años 1961 y 2022, se registró un consumo promedio de 87 millones de toneladas; destacando los nitrogenados, con un 70% del volumen total (FAOSTAT, 2023). La agricultura en México depende de la aplicación de fertilizantes minerales nitrogenados, pues el 61% de la superficie terrestre nacional se caracteriza por tener suelos poco profundos, poco fértiles e incapaces de suministrar el nitrógeno que demandan los cultivos que en ellos se desarrollan (LCRS, 1999). Dicha dependencia y tendencia ha modificado el ciclo global del nitrógeno por generar grandes cantidades de él en su forma reactiva, y seguirá el mismo patrón mientras no exista un equilibrio entre la demanda y el suministro (SEMARNAT, 2019).

Galloway *et al.* (2023) estiman que el 30% del nitrógeno que se adiciona a los cultivos se incorpora a su biomasa y el 70% restante se pierde en forma gaseosa a la atmósfera o por lixiviación. De igual manera, Vargas *et al.* (2022), mencionan que sólo entre el 40-50% del nitrógeno aplicado es utilizado por los cultivos. Hay estudios que evidencian pérdida por lixiviación de nitratos, entre 0.14 y 50% respecto a la fertilización mineral aplicada en cultivos hortícolas, y entre 46 y 68% en arbustos (Narváez, 2008, Daza, 2015; Daza, 2018).

Otro tema relacionado con los nitratos en especies vegetales cultivadas es la salud humana. Existen antecedentes de los posibles efectos del consumo de nitratos contenidos en los vegetales, por lo que algunas regiones del mundo como Estados Unidos y Europa han integrado en su legislación las normativas de contenidos máximos permisibles. En el caso de México, existe una normativa para agua de consumo humano, estableciendo en 11 mg/L (NOM-127-SSA1-2021) su contenido máximo permisible; sin embargo, no hay una normativa vigente para establecer parámetros máximos de nitratos en alimentos de origen vegetal. Por lo tanto, se

requieren estudios que contribuyan y discutan el efecto de los diversos sistemas de producción en el contenido de nitratos en cultivos básicos para la alimentación en nuestro país.

Aunque en México, el maíz es el cultivo más importante por superficie y volumen de producción, las hortalizas en sistemas de producción comercial son las que mayor demanda de insumos presentan y, en términos comerciales, representan el 24% del total de los principales productos exportados mundialmente con más de 10 millones de toneladas. Las hortalizas de mayor exportación son jitomate, pepino, sandía, plátano, lechuga, maíz y melón con 1800, 877, 726, 526, 307, 256 y 109 miles de toneladas respectivamente (SIAP, 2023).

El cultivo de hortalizas es una de las principales actividades agrícolas que abastecen la demanda de alimentos a nivel mundial, y su producción ha experimentado una creciente intensificación en los últimos años, principalmente a través del sistema de agricultura protegida. Este tipo de agricultura permite un control más preciso de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, luz), del uso de recursos y de fauna nociva para el desarrollo de los cultivos (Pratt & Ortega, 2019), lo que favorece un crecimiento acelerado y optimizado de las plantas. De las 29.8 millones (más del 15% de la superficie nacional) que México destinó al uso agrícola, en 2023, más de 77 mil hectáreas se destinaron para la agricultura protegida, con un 28.1% ocupada por invernaderos.

A pesar de las bondades económicas del sistema de agricultura protegida, existen diversos planteamientos que exponen preocupaciones respecto al uso eficiente de los insumos y recursos, y el cuidado de los recursos naturales disponibles, así como los riesgos a la salud de los trabajadores agrícolas y consumidores de los productos obtenidos (Rivera *et al.*, 2023).

El uso de insumos orgánicos ha resultado en reducir el uso de fertilizantes minerales, problemas de acumulación de nitratos en la planta y contaminación de agua por lixiviación (Lora *et al.*, 2006). De igual manera, hay evidencia de múltiples beneficios como incrementar las poblaciones de los microorganismos presentes en el suelo, obtener mayor calidad de productos obtenidos de la producción intensiva de hortalizas, reducir enfermedades en los cultivos, incrementar la longitud de la planta y

su contenido de clorofila, y mejorar las características del suelo como la estructura, la fertilidad, el pH y el intercambio catiónico estimulando el crecimiento y la productividad de las plantas. (Hernández, 2010; Salgado & Nuñez, 2010).

Aunque la agricultura protegida no es un sistema de producción que pueda prescindir del uso de fertilizantes minerales, sí se puede plantear su manejo más eficiente, considerando la mejora de algunas características físicas y químicas del suelo, el aporte de nutrientes del agua, así como los requerimientos reales del cultivo. De acuerdo con Rupp (2024), disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados no es suficiente para reducir la lixiviación de nitratos, por lo que se requieren otras medidas que impacten de manera integral y positiva la producción de cultivos. Existen evidencias del aumento significativo en el contenido de carbono orgánico, nitrógeno y nutrientes disponibles en el suelo al hacer uso de abonos orgánicos, demostrando su beneficio en la fertilidad a largo plazo (Herencia *et al.*, 2008). Específicamente, en el caso de la producción de hortalizas su uso puede mejorar los rendimientos y la calidad de los frutos (Rodríguez *et al.*, 2009). Entre ellas se encuentra la lechuga, la cual es posible cultivarla en invernadero generando altos rendimientos, especialmente utilizando abonos orgánicos en suelos poco fértiles (León *et al.*, 2022; Rasche *et al.*, 2025). También existe evidencia de mejoras en la producción de plántulas de jitomate, el crecimiento, el rendimiento y la calidad nutracéutica de sus frutos, utilizando fertilizantes orgánicos (Reyes *et al.*, 2015; Lazcano *et al.*, 2009; Adekiya *et al.*, 2022; Estrada *et al.*, 2022).

En particular, el humus de lombriz es un compuesto formado principalmente por nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, por lo que se ha considerado un abono orgánico con efectos benéficos sobre el crecimiento y desarrollo de gran cantidad de especies vegetales, debido a su aporte de nutrientes, de microorganismos beneficiosos para el desarrollo vegetal, capaces de aumentar la disponibilidad de nutrientes y mejora en las propiedades físicas del suelo. A lo largo de los últimos años, ha habido numerosos estudios en los que se demuestra que el humus de lombriz denota efectos positivos sobre el crecimiento vegetal y la capacidad productiva, tal como concluye Cordonez (2017) al utilizarlo como fertilizante orgánico en el cultivo de

acelga. En el caso de la producción de frijol, ha incrementado la germinación y productividad (Aguilar *et al.*, 2017); en cultivos de lechuga y repollo ha permitido reducir hasta en 45% la cantidad de fertilizantes minerales, logrando cosechas económicamente rentables (Añez & Espinoza, 2003). Resultados similares se han logrado en el cultivo de pimiento, evidenciando la potencialidad que tiene este abono orgánico para reducir el uso de fertilizantes minerales sin afectar su rendimiento (Abreu *et al.*, 2018). Blouin *et al.* (2019), encontraron que el humus de lombriz genera incrementos en la productividad en un 26% y en biomasa un 78% en cultivos hortícolas como las leguminosas. Así como Tucuch *et al.* (2021), resaltan que la misma fuente orgánica tiene un efecto similar a la fertilización mineral, sin afectar la calidad del fruto y rendimiento del cultivo de chile habanero. Además, se ha demostrado que el uso de abonos orgánicos contribuye a disminuir en casi el triple la cantidad de nitratos liberados al suelo (Kolbe *et al.*, 1999).

Este trabajo de investigación se enfocó en analizar cómo influyen los efectos de la fertilización orgánica y mineral en las propiedades fisiológicas de los cultivos de jitomate y lechuga en invernadero, así como su impacto en las características físicas y químicas del suelo. Para lo anterior se evaluó el rendimiento de ambos cultivos bajo diferentes dosis de fertilización, comparando su crecimiento y desarrollo. En cuanto a las implicaciones ambientales, se abordarán los efectos del contenido de nitratos a través de la aplicación de los fertilizantes en las dosis adecuadas tomando como referencia la mejora de las propiedades del suelo.

## 2. LA AGRICULTURA Y SU RELACIÓN CON LOS NITRATOS EN EL SUELO

El nacimiento de la agricultura ha sido un factor clave en el desarrollo de diversas culturas a lo largo de más de diez mil años. En Mesopotamia y Egipto, se cultivaban trigo y cebada mediante la construcción de diques, embalses y canales para controlar las aguas del río Nilo. En Mesoamérica, el maíz fue fundamental, mientras que en Asia se cultivaba arroz y en Grecia, la uva y el olivo utilizando el arado y el estiércol como abono natural. En el siglo XVIII, Gran Bretaña transformó las técnicas agrícolas, mejorando la fertilidad del suelo al alternar el cultivo de forrajes y legumbres con el cultivo de cereales. Un siglo después, se descubrieron los abonos artificiales mientras que en Europa se comenzó a mecanizar la agricultura. Para el siglo XX, la introducción de fungicidas, insecticidas y abonos artificiales incrementó la rentabilidad de las tierras, así como el uso del tractor redujo la necesidad de mano de obra (SIAP, 2023).

Agricultura es un término que refiere las múltiples actividades productivas con las que el hombre, mediante el cultivo de plantas y animales domésticos, genera alimentos, materias primas y satisfactores de sus necesidades básicas (Harris *et al.*, 2014); además provee mano de obra al sector agroindustrial y de servicios (SADR, 2023). Dichas actividades tienen un impacto trascendental en la salud humana, el ambiente, la economía y el desarrollo a nivel global (Udvardi *et al.*, 2021). En las últimas décadas, innovaciones como el riego por aspersión y por goteo, así como el cultivo intensivo en invernaderos, han generado un gran aumento en la producción agrícola, así como un avance en la ciencia y la tecnología. A pesar de los múltiples beneficios que tiene la agricultura, también hay algunos efectos documentados de sus impactos negativos como la pérdida considerable e irreversible de recursos naturales, la contaminación de agua, suelo y aire, la contaminación ambiental de los agroecosistemas, la contribución en el calentamiento global, la pérdida de biodiversidad y la degradación del suelo (EEM, 2005), teniendo un efecto adverso en los seres humanos, los animales y los ecosistemas acuáticos al comprometer la disponibilidad de alimentos para las generaciones futuras. (Rivera *et al.*, 2023).

La producción agrícola moderna es reconocida como una alternativa de mercado para incrementar la oferta de alimentos, sin embargo, se considera una fuente potencial de daños ambientales y humanos; por su dependencia y gran demanda de energía e insumos químicos como fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, cambio de uso potencial del suelo, uso intensivo de los recursos naturales y disposición inadecuada de desechos (Hedlund *et al.*, 2020; SADR, 2023). En relación con el suelo, a nivel mundial, el 97 % de los países sufre un proceso de degradación severa o extrema de este recurso, por factores y elementos climáticos o por intervención humana; teniendo como consecuencia la degradación de propiedades naturales físicas, químicas y biológicas (SEMARNAT, 2002). Cepeda (2016) define el suelo como un sistema natural y complejo formado por partículas sólidas orgánicas e inorgánicas, aire, agua y microorganismos bajo la influencia del clima y del medio biológico. Se divide en horizonte A, capa más cercana a la superficie donde la actividad de las plantas y animales es mayor y donde ocurre la lixiviación, en horizonte B, capa que se encuentra debajo del horizonte A donde penetran todas las raíces de las plantas y se acumulan los materiales solubles lixiviados, y en horizonte C, capa formada por rocas parcialmente descompuestas y se compone por materia orgánica (5%), materia mineral (45%), agua (25%) y aire (25%).

La producción agrícola depende en gran medida de la salud del suelo por encontrar en él un ambiente con nutrientes, agua y oxígeno, que es adecuado para su crecimiento (Piñeiro *et al.*, 2021). Las plantas son organismos fotosintéticos que utilizan la energía del sol para fijar carbono, construir su biomasa y desarrollarse; el resto de los elementos que necesitan para su crecimiento los toman del suelo (Wall, 2021). Para Tahat *et al.* (2020), la salud del suelo es la capacidad de un suelo para funcionar como un sistema vivo vital dentro de los límites del ecosistema y del uso de la tierra para sustentar la producción vegetal y animal, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire y promover la salud de las plantas y los animales; además de estar estrechamente asociada con la agricultura sustentable porque la diversidad y la actividad de los microorganismos del suelo son los principales componentes de la salud del suelo. Un suelo sano no sólo es indispensable para la producción de cultivos, también permite diversas funciones ecológicas como los ciclos biogeoquímicos,

indispensables para la vida como es almacenar o fijar carbono; almacenar y filtrar agua, y como espacio físico y cultural de las actividades humanas para producir alimentos y biomasa (Burbano, 2016); además de brindar múltiples servicios ecosistémicos como mantener la calidad del agua y la productividad de las plantas, controlar la descomposición del reciclaje de nutrientes del suelo y eliminar gases de efecto invernadero de la atmósfera (Tahat *et al.*, 2020).

Actualmente, la deficiencia de nutrientes en el suelo se corrige principalmente con el uso de fertilizantes, material orgánico o inorgánico, natural o sintético, capaz de proporcionar a las plantas uno o más de los elementos químicos esenciales para su desarrollo normal, como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio(K), por lo que es un factor determinante para aumentar la productividad agrícola (Salgado & Nuñez, 2010) y el rendimiento de los cultivos (Rivera *et al.*, 2023).

El Nitrógeno, proveniente de la atmósfera (78%), es un elemento nutriente indispensable para el crecimiento y desarrollo de las plantas, presente en numerosos compuestos orgánicos vitales, como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y fitohormonas, que requieren en mayor cantidad que otros nutrientes y lo adquieren por fijación del nitrógeno molecular a través de microorganismos presentes en el suelo y mediante la incorporación de materia orgánica al suelo, que en los sistemas productivos actuales es cada vez más escasa. (Kirkby *et al.*, 2020). Debido a la abundancia de nitrógeno en la atmósfera, su poca disponibilidad en el suelo y su alta movilidad, el ciclo del nitrógeno en el ecosistema terrestre se ha visto alterado teniendo un impacto sobre los ecosistemas al generar acidificación, eutrofización y generación de contaminantes como ozono troposférico, nitrato de amonio y sulfato de amonio (Fowler *et al.*, 2013). La facilidad con que el nitrógeno atraviesa las fronteras de los ecosistemas es una de las principales características que determina su comportamiento por las pérdidas antes mencionadas.

El nitrógeno, en el suelo, se encuentra en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) donde las bacterias y los hongos presentes lo convierten en ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ); después algunas bacterias convierten esos iones amonio en iones de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) que se convierten en iones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y son absorbidos por las plantas. Esta conversión, donde los enlaces estables entre los átomos de nitrógeno se rompen permitiendo que los

compuestos de nitrógeno que las plantas pueden utilizar se forman, es comúnmente llamada fijación de nitrógeno. (Cerón & Ancizar, 2012).

De acuerdo con Ramos (1992), para reducir la lixiviación de nitratos es necesario conocer los principales procesos del ciclo del nitrógeno (García *et al.*, 2025), que son:

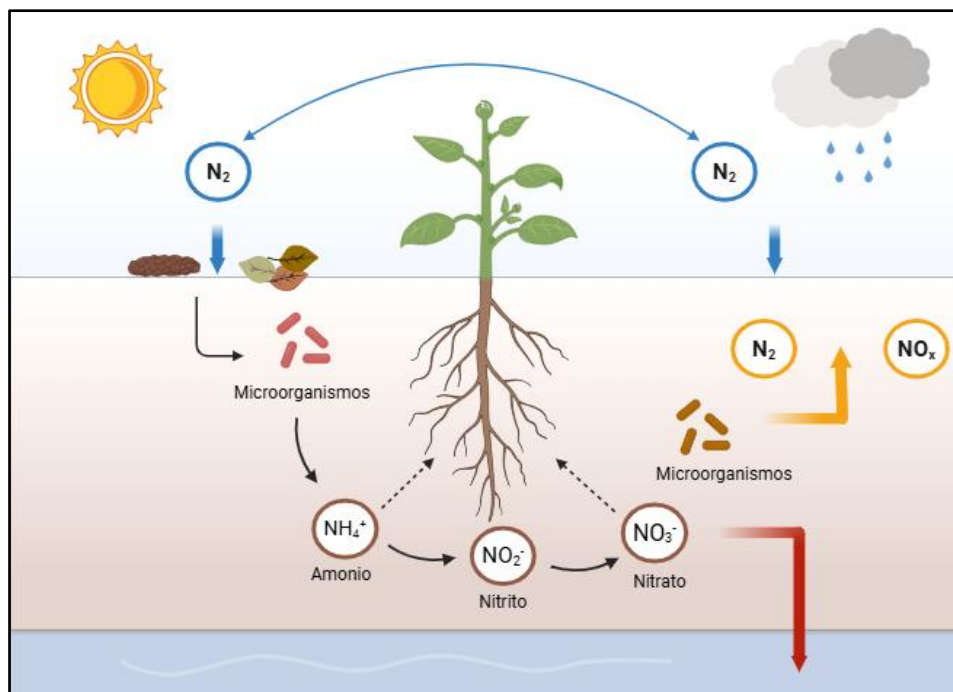


Figura 2. Principales procesos del ciclo del nitrógeno en sistemas agrícolas

Nota. Elaboración propia a partir de *La agricultura y la contaminación de las aguas por nitrato*, por Ramos (1992) y *Principios Básicos de Biogeoquímica de los Ecosistemas Terrestres: La Trasmutación de la Química Terrestre por la Vida* por García *et al.* (2025)

(i) *Fijación biológica del nitrógeno*

Proceso en el que, de acuerdo con Vargas *et al.* (2022), ciertos microorganismos del suelo, comúnmente bacterias que habitan el suelo o en simbiosis con especies vegetales, transforman el nitrógeno gaseoso de la atmósfera en formas asimilables por las plantas. Entre estos microorganismos, las bacterias del género *Rhizobium* desempeñan un papel fundamental, ya que tienen la capacidad de generar nódulos en las raíces de las plantas, donde tiene lugar la fijación del nitrógeno, para que sea accesible para las plantas (Fowler *et al.*, 2013). La lluvia representa una fuente importante de nitrógeno en los ecosistemas naturales, ya que contiene cantidades variables de amonio, nitrato y óxidos de nitrógeno. No obstante, en los sistemas

agrícolas, la contribución de nitrógeno a través de la lluvia es relativamente baja, oscilando entre 5 y 15 kg de nitrógeno por hectárea al año. Esta cantidad es significativamente inferior a la que se obtiene mediante la aplicación de fertilizantes.

(ii) *Nitrificación*

En este proceso, el amoníaco presente en el suelo se transforma primero en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y posteriormente en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Este proceso es facilitado por bacterias aerobias específicas, como Nitrosomonas, que convierten el amoníaco en nitrito, y Nitrobacter, que transforma el nitrito en nitrato. Bajo condiciones óptimas de temperatura y humedad, la nitrificación puede alcanzar tasas de entre 10 y 70 kg de nitrógeno por hectárea al día (García & Gallardo, 2017).

(iii) *Absorción de nitrógeno por las plantas*

Este proceso desempeña un papel fundamental en el rendimiento agrícola, ya que tiene un impacto directo en la productividad y en los ingresos económicos generados. Una vez absorbido por la planta, el nitrógeno retorna al suelo después de la cosecha a través de residuos vegetales como tallos, hojas y raíces. Sin embargo, una parte del nitrógeno se pierde del sistema al ser removida junto con la cosecha, lo que implica una disminución de nutrientes en el suelo (Ramos, 1992).

(iv) *Amonificación*

La amonificación o mineralización es el proceso mediante el cual los microorganismos transforman el nitrógeno de la materia orgánica en amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Este amonio es liberado en la solución del suelo y es aprovechado por otros microorganismos y por las plantas. Este proceso ocurre dentro de las células microbianas y es llevado a cabo por microorganismos heterótrofos (García *et al.*, 2025).

(v) *Inmovilización*

La inmovilización se da cuando el amonio disponible en el suelo es absorbido por los microorganismos y vuelve a sus formas orgánicas. La proporción de carbono en

relación con el nitrógeno (C/N) de la materia orgánica, indica si se producirá mineralización o inmovilización de acuerdo con las condiciones específicas del suelo y el tipo de materia orgánica:

- Si C/N es de 20–25 o menor, ocurre una mineralización, liberando nitrógeno disponible para las plantas.
- Si C/N es mayor que 25, ocurre una inmovilización, ya que los microorganismos consumen más amonio del que liberan (Ramos, 1992).

(vi) *Desnitrificación*

Proceso en el que el nitrato se transforma en nitrógeno gaseoso o en óxidos de nitrógeno, ambos en forma de gases que se liberan a la atmósfera. Este fenómeno tiene lugar en suelos con alta humedad, donde la ausencia de oxígeno obliga a algunos microorganismos a utilizar nitrato en lugar de oxígeno para llevar a cabo su respiración. Según García y Gallardo (2017), las pérdidas de nitrógeno debido a la desnitrificación varían según el contenido de materia orgánica y las condiciones de drenaje del suelo.

(vii) *Lixiviación de nitratos*

Ocurre cuando el nitrato es transportado por el agua que circula a través del suelo, desplazándose hacia capas más profundas, por debajo de la zona donde se encuentran las raíces de las plantas (Civeira & Rodríguez 2012). Este fenómeno constituye una de las principales causas de la contaminación de aguas subterráneas con nitrato, ya que, una vez que el nitrato deja de estar accesible para las raíces, sigue su movimiento descendente hacia los acuíferos sin experimentar transformaciones químicas ni biológicas significativas.

(viii) *Arrastre por escorrentía*

Es el movimiento de agua sobre la superficie del suelo agrícola hacia cuerpos de agua superficiales sin infiltrarse. Ocurre después de lluvias intensas o riegos excesivos, y puede transportar cierta cantidad de nitrógeno. Las pérdidas de nitrógeno en este proceso son bajas y pueden aumentar significativamente cuando la escorrentía se genera después de la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Ramos, 1992).

(ix) *Volatilización*

El amoníaco se libera del suelo hacia la atmósfera y ocurre cuando el amonio presente en el suelo se convierte en amoníaco. El nitrógeno que se pierde por medio de este proceso normalmente es consecuencia de aplicar fertilizantes nitrogenados en forma amónica (Ramos, 1992).

Estos procesos describen las relaciones de intercambio del nitrógeno presente en la atmósfera, el suelo y la biomasa (Azcón & Talón, 2013), los cuales han sido alterados por la actividad humana (Fowler *et al.*, 2013). Dichas alteraciones contribuyen a la transgresión del ciclo del nitrógeno, uno de los nueve límites planetarios que señalan los límites biofísicos que no se deben traspasar para evitar que se produzcan consecuencias catastróficas o daños irreversibles para las personas y el ecosistema (Richardson *et al.*, 2023). Por lo tanto, es fundamental evaluar alternativas más sostenibles en los sistemas de producción intensiva de cultivos, con el objetivo de promover un uso más eficiente de los insumos, reducir el riesgo de lixiviación de nitratos, prevenir la degradación del suelo y minimizar los posibles impactos negativos en la salud humana. En cuanto a la productividad, Sahu *et al.* (2024) concluye que los beneficios son mayores cuando se incorporan fertilizantes orgánicos a largo plazo, lo que facilita el establecimiento de prácticas agrícolas más sostenibles.

En conclusión, los nitratos desempeñan un papel crucial en la producción agrícola y en la salud de los ecosistemas, sin embargo, su uso debe gestionarse de manera racional y responsable para evitar efectos adversos tanto en el ámbito agronómico como ambiental.

### **3. HIPÓTESIS**

La sustitución parcial o total de la fertilización mineral por una fertilización orgánica, en los cultivos de lechuga y jitomate, disminuirá el contenido de nitratos en el tejido vegetal y en el suelo, mejorando simultáneamente las propiedades físicas y químicas del suelo; además de mejorar significativamente las respuestas fisiológicas y el rendimiento agronómico de las plantas.

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1 Objetivo General**

Analizar el comportamiento fisiológico, rendimiento agronómico y contenido de nitratos en tejido vegetal de lechuga y jitomate, y cambios en las propiedades del suelo, por efecto de sustituir parcial o totalmente la fuente mineral de nitrógeno por una fuente orgánica.

#### **4.2 Objetivos específicos**

1. Identificar cambios en variables fisiológicas y en el rendimiento relacionados a la fuente de nitrógeno al suelo en cultivos de lechuga y jitomate.
2. Analizar los parámetros físicos y químicos del suelo antes y después del ciclo del cultivo, para identificar efectos atribuidos a la fuente de fertilización.
3. Comprobar una tendencia decreciente en contenido de nitratos en suelo y planta, por efecto de disminuir la fertilización mineral.

## 5. LITERATURA CITADA

Abreu, E., Araujo, E., Rodríguez, S., Valdivia, A., Fuentes, L. & Pérez, Y. (2018). Efecto de la aplicación combinada de fertilizante químico y humus de lombriz en *Capsicum annuum*. *Centro Agrícola*, 445(1), 52-61.

Adekiya, A., Dahunsi, S., Ayeni, J., Aremu, C., Aboyeji, C., Okunlola, F. & Oyelami, A. (2022). Organic and in-organic fertilizers effects on the performance of tomato (*Solanum lycopersicum*) and cucumber (*Cucumis sativus*) grown on soilless medium. *Scientific Reports*, 12, 12212. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16497-5>

Aguilar, G., Peña, C., Castro, R., Lara, J., Cruz, E., & Rojas, A. (2017). Efecto del vermicompost y estrés hídrico en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Parámetros productivos y relaciones hídricas*, 86, 28-39.

Añez, B., & Espinoza, W. (2003). Respuestas de la lechuga y del repollo a la fertilización química y orgánica. *Revista Forest. Venez*, 47(2), 73-82.

Azcón Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal* (Segunda). Mc GrawHill.

Blouin, M., Barrere, J., Meyer, N., Lartigue, S., Barot, S., & Mathieu, J. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 34.

Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias agrícolas*, 33(2), 117-124.

Cardelli, R., Becagli, M., Marchini, F., & Saviozzi, A. (2017). Effect of Biochar, Green Compost, and Vermicompost on the Quality of a Calcareous Soil: A 1-Year Laboratory Experiment. *Soil Sci*, 182(7), 1-8.

Cepeda, J. (2016). *Química de suelos* (2.<sup>a</sup> ed.). Trillas.

Cerón, L. & Ancízar, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.

Civeira, G., & Rodríguez, M. (2011). Nitrógeno residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta-zeolitas. *Ciencia del suelo*, 29(2), 285-294.

Cordonez, R. (2017). Comportamiento agronómico de nabo (*Brassica rapa*) y acelga (*Beta vulgaris* subsp.) con fertilizantes orgánicos [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2b30a8fd-c055-4547-b2f1-b7658b5d3f28/content>

Daza, M., Díaz, J., Aguirre, E., & Urrutia, N. (2015). Efecto de abonos de liberación lenta en la lixiviación de nitratos y nutrición nitrogenada en estevia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(1), 112-123. <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3750>

Daza, M., Escobar, S., & Urrutia, N. (2018). Evaluación de dosis nitrogenadas en albahaca y su efecto en la lixiviación de nitratos. *Suelos Ecuatoriales*, 48, 50-56. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=783152>

Diario Oficial de la Unión Europea (2011). Contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios. No 1881/2006. *Official Journal of the European Union* 320,15-17.

Ehlig, C.F. y Hagemann, R.W. (1982). Nitrogen management for irrigated annual ryegrass in Southwestern United States. *Agron. J*, 74, 820-823.

Estrada, E., Murillo, B., Cervantes, T., Gallegos, M., Fortis, M. & Vázquez, C. (2022). Fertilización orgánica para mejorar calidad nutraceútica de híbridos de tomate y su efecto en las propiedades químicas del suelo. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1613>

Etchevers, J., Saynes, V., Sánchez, M. & Roosevelt, F. (2016). Manejo sustentable del suelo para la producción agrícola. *Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México. Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduados. México*, 63-79.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005).

FAO. 2023. *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023*. Rome.

FAO. 2024. *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2024*. Rome.

Follett, R. & Hatfield, J. (2001). Nitrogen in the environment: sources, problems, and management. *The Scientific World Journal*, 1, 920.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2023). *Anuario estadístico de agricultura y alimento mundial 2023*. Roma: FAO statistics. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e04f2b4-82fc-4740-8cd5-9b66f5335239/content>

Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M., Cape, J., Reis, S., Sheppard, L., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., & Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions Of The Royal Society*, 368, 1-13. <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstb.2013.0164>

Galloway, J., Townsend, A., Erisman, J., Bekunda, M., Freney, J., Martinelli, L., Seitzinger, S., & Sutton, M. (2008). *Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions*. 320, 889-892.  
<https://doi.org/10.1126/science.1136674>

García, L. & Gallardo, A. (2017). El ciclo global del nitrógeno. Una visión para el ecólogo terrestre. *Ecosistemas*, 26(1), 4-6.

García, F., Tapia, Y., Chávez, P., Morón, J., & Vélez, P. (2025). *Principios Básicos de Biogeoquímica de los Ecosistemas Terrestres: La Trasmutación de la Química Terrestre por la Vida* (1.<sup>a</sup> ed.). IIES, UNAM.

[https://www.iies.unam.mx/wp-content/uploads/2025/06/Libro-de-biogeoquimica2025.pdf?fbclid=IwY2xjawLc1uhleHRuA2FibQIxMQABHvZ32eTf1Jsq25TdYDHJeaDfOBJuak7RKsiv5fMRoFo2FMMR\\_AdkxEdR-WWj\\_aem\\_JXbwGhWv2Mj0nXoR06y1aA](https://www.iies.unam.mx/wp-content/uploads/2025/06/Libro-de-biogeoquimica2025.pdf?fbclid=IwY2xjawLc1uhleHRuA2FibQIxMQABHvZ32eTf1Jsq25TdYDHJeaDfOBJuak7RKsiv5fMRoFo2FMMR_AdkxEdR-WWj_aem_JXbwGhWv2Mj0nXoR06y1aA)

Herencia, J. F., Ruiz, J. C., Melero, S., Galavís, P. G., & Maqueda, C. (2008). A short-term comparison of organic v. conventional agriculture in a silty loam soil using two organic amendments. *The Journal of Agricultural Science*, 146(6), 677-687.  
<https://doi.org/10.1017/S0021859608008071>.

Kirkby, E., Le Bot, J., Adamowicz, S., Römheld, V. Nitrogen in physiology. An agronomic perspective and implications for the use of different nitrogen forms. *IFS Conference, International Fertiliser Society (IFS)*. Cambridge, United Kingdom. 46 p.

Kolbe, H., Jäckel, U., Schuster, M. (1999). Development of the nutrient contents and pH-value in the depth profile of test areas during the course of conversion to organic agriculture. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 40,145-151.

Lassaletta, L., Aguilera, E., Blas, A., & Sanz, A. (2019). Los impactos ambientales de los sistemas de producción de alimentos. *Dossiers Economistas sin Fronteras: El futuro de la alimentación en el mundo*, 33, 24-29.

Lazcano, C., Arnold, J., Tato, A., Zaller, J. G. & Domínguez, J. (2009). Compost and vermicompost as nursery pot components: Effects on tomato plant growth and morphology. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(4), 944–951.

Ley de conservación y restauración de suelos (1999).

León, R., Jaramillo, J., Montes, M., Orozco, A., Carrascal, F., Villagrán, E. & Rodríguez A. (2022). Evaluación agronómica y fisiológica de cinco cultivares de lechuga bajo dos sistemas de agricultura protegida en el departamento de Magdalena, Colombia. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 26, 79–93. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.06>

Narváez, L., Cáceres, R., Marfà, O. & Cabrils, C. (2008). Pérdidas de nitrógeno por lixiviación en un cultivo en contenedor y al exterior de *Viburnum tinus* usando diferentes estrategias de fertilización.

Neri, J., Collazos, R., Huamán, E. & Oliva, M. (2017). Aplicación de abonos orgánicos y biofertilizante en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), distrito de Chachapoyas. *Revista de Investigación en Agroproducción Sustentable*, 1(1), 38–46. <https://doi.org/10.25127/aps.20171.348>

Pratt, L., & Ortega, J. M. (2019). Agricultura protegida en México. *Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado*, 1-57.

Piñeiro, G., Pinto, P., Berenstecher, P., Della, T., & Villarino, S. (2021). La salud del suelo y la sustentabilidad de los agroecosistemas. *MDA*, 2(2). [https://www.gba.gob.ar/desarrollo\\_agrario/revista\\_mda](https://www.gba.gob.ar/desarrollo_agrario/revista_mda)

Ramos, C., & Ocio, J. (1992). *La agricultura y la contaminación de las aguas por nitrato* (N.º 7/92). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. Recuperado 27 de abril de 2025.

Rao, E. & Puttanna, K. (2000). Nitrates, agriculture and environment. *Current Science*, 79(9), 1163-1168.

Rasche, J., González, A., Ferreira, A., Ruiz & Fatecha, D. (2025). Fertilización mineral y orgánica en el cultivo de lechuga (*lactuca sativa* L.) en el Distrito de Caazapá. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica*, 9(1), 63–77. [https://doi.org/10.36003/Rev.investig.cient.tecnol.V9N1\(2025\)6](https://doi.org/10.36003/Rev.investig.cient.tecnol.V9N1(2025)6)

Reyes, J., Torres A., Murillo, B., Herrera, M., Guridi, F., Luna, R., López, R. & Real, G. (2015). Humatos de vermicompost y su efecto en el crecimiento de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Biotecnia*, 17(2), 9–12.

Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F. & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), 2458.

Rivera, L., Benavides, A., Robledo, A., & González, S. (2023). La salud del suelo y el uso de bioestimulantes. *Agraria*, 20(3). <https://doi.org/10.59741/agraria.v20i3.46>

Rodríguez, N., Cano, P., Figueroa, U., Favela, E., Moreno, A., Márquez, C., Ochoa, E., & Preciado, P. (2009). *Uso de abonos orgánicos en la producción de tomate en invernadero*. 27(4), 319-327.

Romero, M. & Suárez, E. (2017). Emisión de N<sub>2</sub>O en cultivos hortícolas y estrategias de mitigación. *Ecosistemas*, 26(1), 79-85.

Rupp, H., Tauchnitz, N., & Meissner, R. (2024). The influence of increasing mineral fertilizer application on nitrogen leaching of arable land and grassland—results of a long-term lysimeter study. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1-18.

Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). *Manual de producción de lechuga*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Sahu, H., Kumar, U., Mariappan, S., Mishra, A. P., & Kumar, S. (2024). Impact of organic and inorganic farming on soil quality and crop productivity for agricultural fields: A comparative assessment. *Environmental Challenges*, 15, 1-11.

Salgado, Sergio, & Núñez, Roberto. (2010). *Manejo de fertilizantes Químicos y Orgánicos* (Primera). bba.

Sánchez, C. (2024). *Beneficios de la asociación de cultivos hortícolas para reducir insumos y mejorar la productividad y salud del suelo* [Tesis]. Universidad Politécnica de Cartagena.

Salehzadeh, H., Maleki, A., Rezaee, R., Shahmoradi, B., & Ponnet, K. (2020). The nitrate content of fresh and cooked vegetables and their health-related risks. *PloS one*, 15(1), 1-14.

Savci, S. (2012). Investigation of effect of chemical fertilizers on environment. *Apcbee Procedia*, 1, 287-292.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2023). *Panorama agroalimentario 2023*. México.

Secretaría de Salud (SSA) (2010). NOM-127-SSA1-2021, *Agua para uso y consumo humano*. Límites permisibles de la calidad del agua. Ciudad de México, México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-021-RECNAT-2000. *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.* 2002.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). *Panorama agroalimentario 2023.*

Tahat, M., Alananbeh, M., Othman, K. & Leskovar, I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 1-26.

Tucuch, C., Mejía, M. & Tucuch, I. (2021). Uso de un abono orgánico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). In: Saynes V., Fernández F., Ortiz, J. (Eds.). *Uso Eficiente de Nitrógeno en la Agricultura. México*, 159 - 163.

Udvardi, M., Below, F. E., Castellano, M. J., Eagle, A. J., Giller, K. E., Ladha, J. K. & Peters, J. W. (2021). A research road map for responsible use of agricultural nitrogen. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 1-18.

Vargas, P., Alejandro, A., Centanaro, P., & Valverde, L. (2022). Efectos de la fertilización nitrogenada en el cultivo de lechuga (*lactuca sativa*) en el cantón Pedro Carbo, provincia del Guayas. *Sathiri* (18)1, 144-157. <https://doi.org/10.32645/13906925.1196>

Wall, L. (2021). La agricultura en tiempos de los microbiomas. *MDA*, 2(2). [https://www.gba.gob.ar/desarrollo\\_agrario/revista\\_mda](https://www.gba.gob.ar/desarrollo_agrario/revista_mda)

Wang, Z. & Li, S. (2019). Nitrate N loss by leaching and surface runoff in agricultural land: A global issue (a review). *Advances in agronomy*, 156, 159-217.

## Capítulo 1. Contenido de nitratos, reacciones fisiológicas y rendimiento en cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) con gestión racional de fertilizantes nitrogenados

### 1.1 Introducción

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) tiene un origen silvestre y su domesticación probablemente ocurrió en Egipto, la cual se expandió a Grecia, Roma y otras partes del Mediterráneo. Su cultivo en Europa Occidental se documentó por primera vez en 1485 y fue introducida al continente americano en 1494. Desde entonces, se han desarrollado numerosas variedades que hoy se cultivan a nivel mundial (Saavedra *et al.*, 2017).

México es uno de los principales productores de lechuga en América Latina, donde las condiciones climáticas y del suelo son favorables para su producción durante gran parte del año (SIAP, 2023). De lo anterior se deriva su relevancia económica, ya sea por el amplio consumo en el país y por la exportación al extranjero.

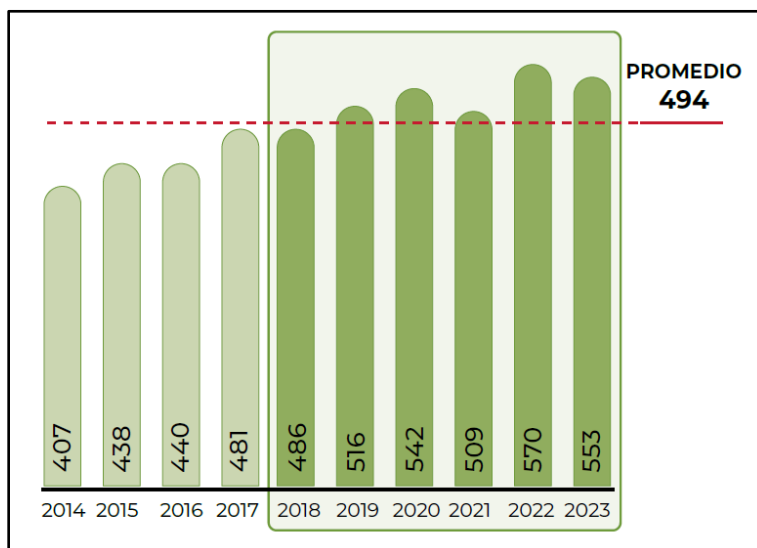


Figura 3. Volumen de producción nacional de lechuga en miles de toneladas

Nota. Imagen tomada de *Panorama Agroalimentario 2024*, por SIAP, 2025, <https://panorama.agricultura.gob.mx/vista/panorama-agroalimentario.php>

Con base en datos del SIAP (2023), México tuvo una superficie cosechada en invernadero de 51 hectáreas, con valor de producción de 31,856.19 miles de pesos y un rendimiento de 103.07 ton/hectárea. En el sistema a cielo abierto, la superficie cosechada fue de 22,796.03, con una producción de 2,951,046.33 miles de pesos y un rendimiento de 24.03 ton/ha. Estos datos demuestran que el rendimiento de lechuga en invernadero supera en casi 500% el rendimiento a cielo abierto; además, la superficie cultivada es cuatrocientas veces mayor a cielo abierto.

La lechuga es una hortaliza de ciclo corto, valorada por su contenido en agua, fibra, vitaminas (como A, C y E) y minerales. Su bajo aporte calórico y sus propiedades antioxidantes la convierten en un alimento esencial dentro de una dieta saludable con un consumo anual per cápita de 2.2 kg. Pertenece a la familia Asteraceae, es una planta de hoja verde formada por grandes hojas dentadas que se disponen unas sobre otras formando un repollo. Su tallo se caracteriza por un rosetón de forma cilíndrica compactada y posee una raíz pivotante, relativamente gruesa en la corona que se adelgaza gradualmente en profundidad (Saavedra *et al.*, 2017; SIAP, 2020). La temperatura óptima para su crecimiento está entre 15°C y 18°C, con un suelo ligero, arenoso y bien drenado a un pH óptimo de 6.7 a 7.4. Se desarrolla óptimamente en un ambiente con una humedad relativa de entre el 60% y el 80% (SIAP, 2020).



Figura 4. Lechuga

Nota. Imágenes tomadas de *Panorama Agroalimentario 2024*, por SIAP, 2025, [https://nube.agricultura.gob.mx/panorama\\_siap/](https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_siap/)

La fertilización del cultivo desempeña un papel determinante en la productividad, calidad y sanidad de la lechuga. Mientras que la fertilización mineral suele ofrecer resultados rápidos y controlados en el crecimiento de la planta, su uso excesivo puede

conllevar efectos negativos como la acumulación de nitratos en el suelo o el tejido foliar. El principal lugar de acumulación de nitratos en las plantas de lechuga son sus hojas externas, y la cantidad varía según su genética, condiciones ambientales y las prácticas agronómicas empleadas. Además, diversos aspectos como la textura del suelo utilizado, la fuente de fertilizantes, la temporada y el tipo de cultivo de lechuga, influyen en dicha acumulación (Esteban, 2009).

Por lo general, la concentración de nitrato en la planta aumenta conforme a la disponibilidad de nitrógeno en el medio de cultivo, ya que forma parte de las proteínas y la clorofila logrando un mayor rendimiento (Guillén, 2023). Es por ello que, según Ehlig & Hagemann (1982), existen normas que dictan un contenido máximo permisible de nitratos en lechuga para consumo humano. En Estados Unidos es de 2000 ppm, mientras que en Europa la norma indica valores entre 3,500 a 4,000 ppm (DOE, 2011).

En contraste, la fertilización orgánica, aunque más lenta en su liberación de nutrientes, favorece la mejora de las propiedades físicas y biológicas del suelo, y puede reducir los riesgos asociados al exceso de nitrógeno disponible (Navarro *et al.*, 2021).

Por lo antes expuesto, analizar los efectos de la fertilización orgánica y mineral en la fisiología y rendimiento de la lechuga, así como en las propiedades del suelo, en este trabajo se considera preponderante implementar prácticas agrícolas que garanticen alimentos más inocuos y la conservación de recursos naturales clave como el suelo.

## 1.2 Materiales y métodos

El experimento se estableció en un invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad de 60 m<sup>2</sup> en el Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Figura 5). Su ubicación es a 22° 07' 37" LN y 100° 56' 39" LO, a 1,866 m.s.n.m. Su temperatura media anual es de 17.4°C y su precipitación total anual de 392.5 mm, por lo que predomina un clima seco templado con lluvia en verano (Moreno *et al.*, 2004).



Figura 5. Invernadero utilizado para el establecimiento del cultivo de lechuga

Se planteó un diseño completamente al azar y se utilizó semilla certificada de la variedad Tulum de tipo iceberg; la unidad experimental fue una maceta con 3 kg de tierra y una planta (Figura 6). El experimento se realizó en los meses de junio a agosto del año 2024.



Figura 6. Unidad experimental del cultivo de lechuga

Se recolectó material de los primeros 20 cm de profundidad de un suelo de tipo Leptosol, de una parcela en descanso (Figura 7), ubicada en la comunidad de Los López, en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (22° 13' 43" LN y 101° 04' 31" LO, a 2,000 m.s.n.m. (INEGI, 2013).



Figura 7. Suelo agrícola de parcela en descanso (A) en el sitio, (B) homogeneizado para el cultivo de lechuga

## Caracterización de suelo y agua

Las propiedades físicas y químicas iniciales y finales del suelo utilizado fueron analizadas en el área de laboratorio de Ecología Vegetal del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, con base en la NOM-021-RECNAT-2000. Para el riego se utilizó agua de la red pública de suministro de agua potable cuyas propiedades para uso agrícola fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición FERTILAB®.

## Manejo del cultivo

### Trasplante

El trasplante se realizó en bolsas de polietileno de 5 L con 3 kg de tierra cada una. Un día antes del trasplante, éste se llevó a capacidad de campo. Se colocaron las plántulas en el centro de las bolsas a una profundidad de 15 cm.

### Riego

El riego se realizó de forma manual, de acuerdo con las necesidades diarias del cultivo, todos los días desde el trasplante hasta la cosecha. El requerimiento del riego

fue determinado por el sustrato, las condiciones de temperatura y el desarrollo de la planta.

### Fertilización

Se determinó que la dosis óptima de nitrógeno para el cultivo de lechuga en la región es de 145 kg/ha (SAGARPA, 2011). Sin embargo, esa cantidad se ajustó considerando el aporte de nitrógeno del suelo y el agua a utilizar en el experimento. Una vez realizado el ajuste, se calculó la cantidad de fertilizante para siete tratamientos de fertilización (Tabla 1), donde las relaciones de fertilizante mineral y fertilizante orgánico (FM/FO) fueron 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 y 0/100, con siete repeticiones cada una.

Tabla 1. Tratamientos de fertilización orgánica y mineral en cultivo de lechuga y cantidad de fertilizante aplicado (g)

	<b>Fertilizante mineral (%)</b>	<b>Fertilizante orgánico (%)</b>
<b>T1</b>	100 (1.37)	0 (0.0)
<b>T2</b>	95 (1.30)	5 (4.5)
<b>T3</b>	90 (1.23)	10 (9.0)
<b>T4</b>	85 (1.17)	15 (13.5)
<b>T5</b>	80 (1.10)	20 (18.0)
<b>T6</b>	75 (1.03)	25 (22.5)
<b>T7</b>	0 (0.0)	100 (90.0)

Los fertilizantes utilizados fueron nitrato de calcio como fuente mineral, el cual se aplicó a los 15, 30 y 45 días después del trasplante (ddt) (Figura 8), en proporción de 20, 50 y 30%; y humus de lombriz de Green Forest®, que es un producto orgánico incluido en la lista OMRI, que se aplicó en una sola dosis a los 15 ddt.

Para cubrir posibles deficiencias de microelementos se aplicó Bayfolan® cada dos semanas a todos los tratamientos.

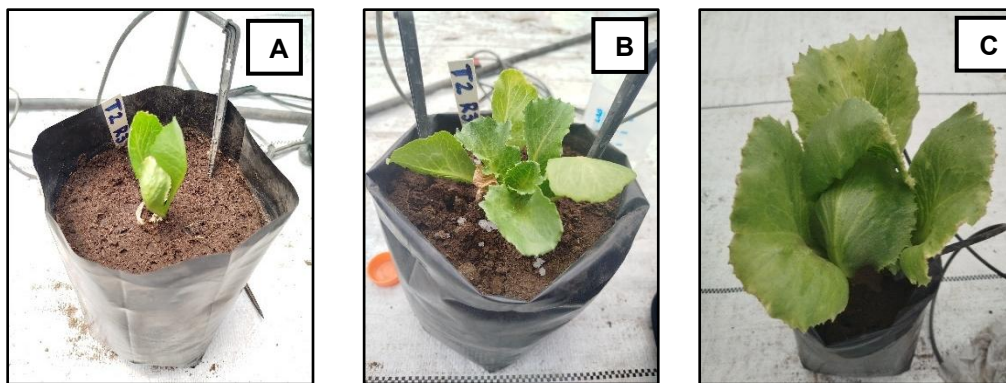


Figura 8. Plantas de lechuga a los 15 días (A), 30 días (B) y 45 días (C) ddt

### Monitoreo de plagas y prevención de enfermedades

Se colocaron trampas amarillas de 30 x 30 cm distribuidas aleatoriamente dentro del invernadero para el monitoreo de insectos plaga. No fueron necesarias aspersiones de control.

### Cosecha

La cosecha se realizó a los 75 días después del trasplante, cuando la cabeza se mostró compacta.

### **Variables determinadas en el cultivo de lechuga**

Se determinaron las variables fisiológicas contenido de clorofila, conductancia estomática ( $g_s$ ) y eficiencia fotosintética ( $F_v/F_m$ ) en planta, y contenido de nitratos ( $NO_3^-$ ) en savia; las variables de rendimiento diámetro ecuatorial, peso fresco en cabeza; y las variables de parámetros fisicoquímicos pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, materia orgánica y contenido de nitratos ( $NO_3^-$ ) en suelo.

En la Tabla 2 se presentan las variables fisiológicas y de rendimiento registradas en diferentes momentos del ciclo del cultivo.

Tabla 2. Variables, equipo y periodicidad de medición en planta de lechuga

	<b>Equipo de medición</b>	<b>Periodicidad</b>
<b>Variables Fisiológicas</b>		
Contenido de clorofila mg·m <sup>2</sup>	Medidor portátil de clorofila (CCM-300, OPTI-SCIENCES)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Conductancia estomática (g <sub>s</sub> ) mmol·m <sup>-2</sup> s	Porómetro (SC-1 METER Group, DECAGON DEVICES)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Eficiencia fotosintética (Fv/Fm)	Medidor de fluorescencia de clorofila (OS30P+, OPTI-SCIENCES)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Contenido de nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) ppm	Medidor selectivo de iones (LAQUATWIN, HORIBA)	Al inicio y final del ciclo de cultivo
<b>Variables de rendimiento</b>		
Peso fresco g	Balanza electrónica de precisión (VELAB)	Cosecha
Diámetro ecuatorial cm	Cinta métrica flexible	Cosecha

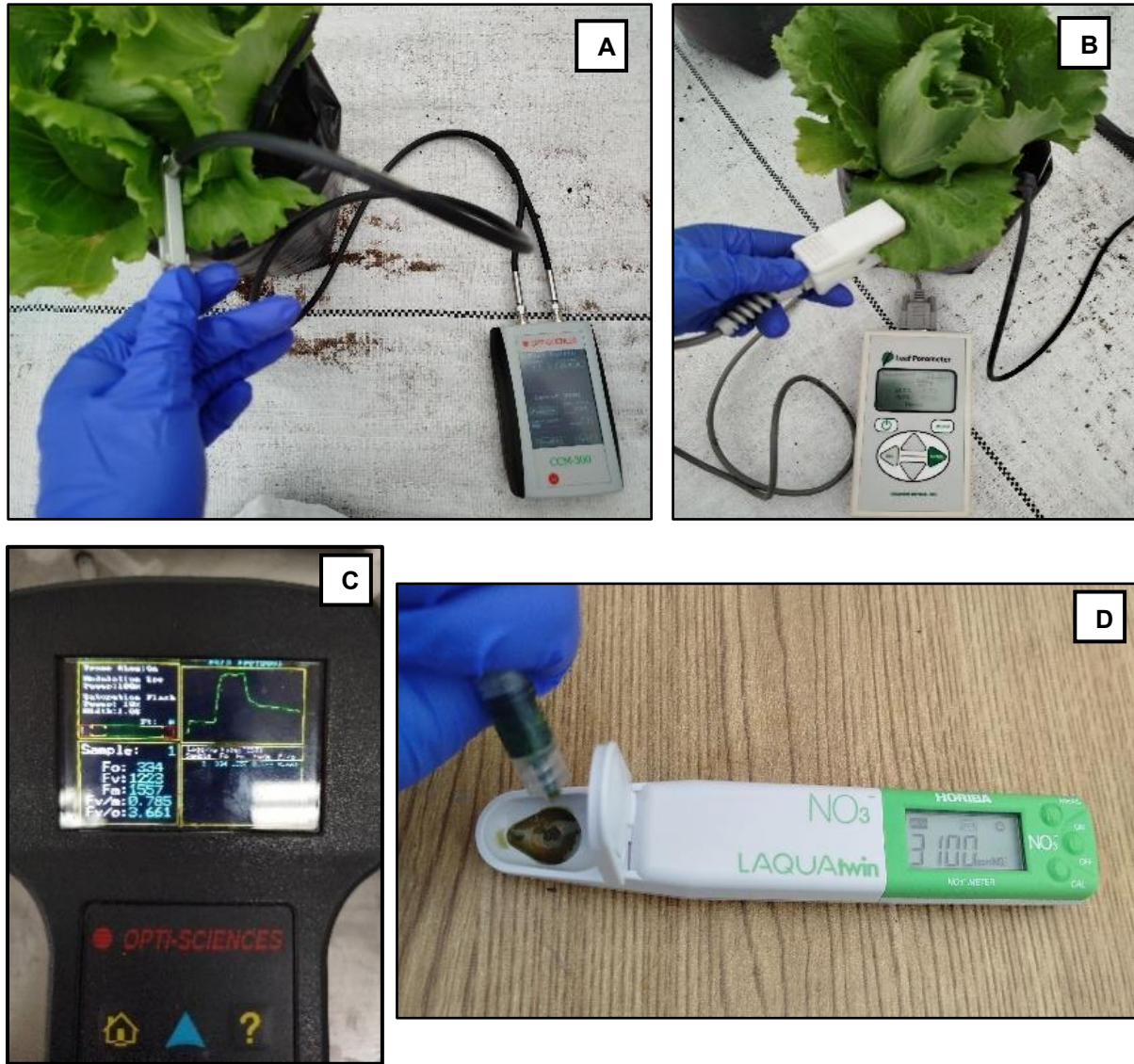


Figura 9. Equipos utilizados en la medición de variables fisiológicas del cultivo de lechuga. (A) contenido de clorofila, (B) conductancia estomática, (C) eficiencia fotosintética y (D) contenido de nitratos

En la Tabla 3 se presentan las variables del suelo registradas en diferentes momentos del ciclo del cultivo.

Tabla 3. Variables, equipo y periodicidad de medición en suelo

	<b>Equipo de medición</b>	<b>Periodicidad</b>
<b>Variables de parámetros físicos y químicos en suelo del cultivo</b>		
pH	Medidor de pH (ORION 4 STAR, THERMO SCIENTIFIC)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Conductividad eléctrica (CE) dS/m	Equipo portátil para medir CE y Humedad del suelo (TDR 150, FIELDSCOUT)	Una vez cada tres semanas
	Equipo para medir CE del suelo (ORION, THERMO SCIENTIFIC)	Cosecha
Materia orgánica (MO) %	Metodología según la NOM-021-RECNAT-2000	Cosecha
Densidad aparente (DAp) g/cm <sup>3</sup>	Metodología según la NOM-021-RECNAT-2000	Cosecha
Contenido de nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) Ppm	Medidor de nitratos (LAQUATWIN, HORIBA)	Cosecha



Figura 10. Equipo utilizado en la medición de conductividad eléctrica en suelo durante el cultivo de lechuga

Al finalizar el ciclo de cultivo, se realizó el análisis de suelo de pH, conductividad eléctrica, densidad aparente y materia orgánica de acuerdo con la metodología descrita en la NOM-021-REC/NAT-2000 (Figura 11).



Figura 11. Realización de los análisis del suelo después de la cosecha

Las condiciones climáticas dentro del invernadero fueron registradas mediante un datalogger HOBO, el cual permitió monitorear temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica.

## Análisis estadístico

Los datos obtenidos en las unidades experimentales fueron ordenados por fecha de muestreo y por ciclo de reproducción, los cuales se analizaron por las pruebas de Levene para la homogeneidad de varianzas, posteriormente se procedió al análisis de varianza, así como las pruebas de sensibilidad de medias de Tukey y LSD de Fisher ( $P < 0.05$ ) para determinar las diferencias entre tratamientos. Cuando no se reportaron diferencias, se realizaron pruebas de contrastes y polinomios ortogonales para ver la tendencia de los tratamientos utilizando el software SAS para Windows versión 9.0.

### 1.3 Resultados y discusión

**Caracterización de suelo y agua:** Los valores obtenidos de las propiedades fisicoquímicas del suelo y agua de riego, antes de iniciar el ciclo de cultivo, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del suelo y agua de riego

Parámetro	Suelo	Agua
pH	7.91	7.94
Conductividad eléctrica (dS/m)	1.60	0.49
<b>Materia orgánica (%)</b>	<b>5.63</b>	-
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.02	-
Textura	Franco	-
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ppm)</b>	<b>222.4</b>	<b>12.4</b>
N (mg/kg)	50.2	2800
P (mg/kg)	49.7	-
K (mg/kg)	717	11,300

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, los parámetros obtenidos se consideran adecuados para considerar que el suelo de origen del sustrato utilizado en el experimento es de buena calidad para uso agrícola. El valor de pH correspondió a un

suelo medianamente alcalino. El pH indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución y en el suelo afecta directamente el crecimiento de las plantas debido a su influencia sobre la disponibilidad de nutrientes (Rivera *et al.*, 2018). En general, Ibarra *et al.* (2009), mencionan que el pH óptimo de los suelos agrícolas debe variar entre 6.5 y 7.0 para obtener los mejores rendimientos; mientras que Osorio (2012) considera que un pH ligeramente ácido, entre 6.0 y 6.5 es el adecuado para la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Por lo tanto, la adaptabilidad de cada especie cultivada a un rango determinado de pH hace que este sea el principal criterio con respecto a la dinámica de los nutrimentos que serán absorbidos por sus raíces (INTAGRI, 2018).

La conductividad eléctrica es una medida indirecta del contenido de sales disueltas en el suelo y se refiere al contenido de sales totales en él (Castellanos *et al.*, 2000). Los resultados del análisis arrojaron valores de un suelo muy ligeramente salino, por lo que es apto para su uso agrícola. Con este sustrato, el riesgo de inducir estrés hídrico, bajo rendimiento y daños fisiológicos a las plantas por altas concentraciones de sales es mínimo (Salgado *et al.*, 2006).

Con respecto a la materia orgánica, Salgado *et al.* (2006) refiere que son los materiales provenientes de organismos vivos que, cuando se incorporan al suelo en forma de residuos de cultivos, como vegetación o animales muertos, siguen un proceso de mineralización que libera nutrientes que pueden ser asimilados por las raíces de las plantas en crecimiento. En este caso, el suelo analizado es rico en materia orgánica.

Quintero *et al.* (2011) definen la densidad aparente como la materia seca por unidad de volumen aparente del sustrato seco incluyendo el espacio poroso entre partículas. El valor del material utilizado es menor a lo reportado para suelos francos, lo que puede atribuirse al muy alto contenido de materia orgánica.

En concordancia con lo anterior, el contenido de nitrógeno es elevado y su explicación parcial puede estar relacionada con la fijación biológica y la descomposición de materia orgánica.

La textura de un suelo está muy relacionada con su capacidad de proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas. De acuerdo con la literatura, un suelo franco posee una adecuada proporción de partículas de arena, limo y arcilla, lo que le permite un buen drenaje. Su estructura admite una buena oxigenación para el

desarrollo de las raíces de las plantas, por lo que hay una disponibilidad óptima de nutrientes; esto lo hace un suelo ideal para la agricultura (Jiménez, 1989). Además, su alto contenido de materia orgánica es una fuente de nutrientes para las plantas y promueve la actividad biológica mejorando su estructura y textura obteniendo una mayor fertilidad (Molina, 2007).

El agua utilizada para el riego presentó un pH moderadamente alcalino y baja salinidad, características que la clasifican como adecuada para su uso agrícola sin restricciones (Tabla 4).

Para efectos del presente estudio, en la tabla 5 se presentan los valores de las condiciones climáticas dentro del invernadero registrados por el datalogger HOBO, únicamente en las fechas que coincidieron con las mediciones de cada una de las variables, con el fin de establecer una relación directa entre las condiciones ambientales y la respuesta de las plantas.

Tabla 5. Condiciones experimentales dentro del invernadero durante el ciclo de cultivo de lechuga

<b>Días después de trasplante (ddt)</b>	<b>Temperatura puntual (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Temperatura máxima del día (°C)</b>	<b>Intensidad lumínica (lux)</b>
<b>21</b>	19.6	85.2	45.2	4734.2
<b>28</b>	20.2	73.4	49.9	5798.5
<b>35</b>	22.7	63.0	49.6	145.8
<b>42</b>	22.8	59.3	53.3	272
<b>49</b>	20.6	76.1	48.8	5711.8
<b>56</b>	16.6	78.3	49.2	3646.2
<b>63</b>	18.6	79.4	44.8	2913

**Contenido de Clorofila:** En las plantas, la clorofila es un tipo de pigmento fotosintético que absorbe la energía lumínica del sol que se utiliza en el proceso de la fotosíntesis (Limantara *et al.*, 2015); y en los vegetales se encuentran la clorofila *a* y la clorofila *b* (Azcón & Talón, 2013). El contenido de clorofila está estrechamente relacionado con el contenido de nitrógeno foliar. Su medición permite monitorear el estado nutricional de las hortalizas y la senescencia foliar (Xu & Mou, 2016).

En este estudio, la prueba de Tukey registró que no existieron diferencias ( $P>0.05$ ) entre tratamientos en las fechas de muestreo; sin embargo, en el promedio final a excepción de los tratamientos 90/10 y 0/100, que fueron diferentes ( $P<0.05$ ), en el resto de las combinaciones de fertilizantes no se registraron diferencias ( $P>0.05$ ) (Tabla 6). El tratamiento 90/10 presentó un mayor contenido de clorofila ( $306.64 \text{ mg/m}^2$ ) en promedio, mientras que el valor más bajo ( $267.5 \text{ mg/m}^2$ ) se encontró en el tratamiento 0/100.

La prueba de medias mediante LSD evidenció que, a excepción del muestreo realizado a los 28 ddt donde se registraron los valores más altos en el experimento, en el resto de las mediciones y en el promedio final si se registraron diferencias ( $P<0.05$ ). En la primera medición, el mejor tratamiento fue 80/20 ( $P<0.05$ ) superando en 35% al 100/0 que registró el menor valor. En la medición a los 35 ddt, los tratamientos 100/0 y 90/10 (mayor proporción de fertilizante mineral) registraron los mayores valores ( $P<0.05$ ) superando, en promedio, un 30% más de contenido de clorofila a los tratamientos 95/5 y 0/100. Éste último mostró los menores valores ( $P>0.05$ ) en el resto de las mediciones y en el promedio final, siendo superado en 16% por el 90/10, el cual registró los valores más altos desde los 35 ddt hasta el final del experimento. (Tabla 7).

Se sabe que, algunos de los principales factores que afectan la síntesis de clorofila son: la luz, la temperatura, la genética, edad de la hoja y la disponibilidad de nitrógeno en el sustrato (Slamet *et al.*, 2017). En este sentido, en este experimento la luz y la genética no se consideran factores determinantes en las diferencias encontradas. Sin embargo, la disponibilidad de nitrógeno en el sustrato sí, ya que el aporte de este nutriente supera un 78% en el tratamiento 2, respecto al tratamiento 7. En estudios

previos ya se ha planteado un patrón cualitativo de correspondencia entre los niveles de clorofila y los de nitrógeno en la fertilización (Li *et al.*, 2024). También se observó que, a medida que avanzaba el ciclo de producción, las hojas de plantas con el tratamiento de aporte alto de fertilizante mineral presentaron valores de contenido de clorofila más altos que aquellas con una baja concentración del mismo. Este comportamiento indica que una alta concentración de fertilizante mineral ayudará a incrementar la producción de clorofila durante el crecimiento de la planta.

La temperatura del sustrato cambió entre tratamientos y con ello la temperatura foliar, que al aumentar sugiere decrecimiento en la transpiración (León *et al.*, 2022), crecimiento anormal de la raíz y reducción en la absorción de nutrientes (Lora *et al.*, 2006), provocados por la temperatura y la humedad ambiental dentro del invernadero. Esto se advirtió en observaciones, pero no se midió.

Tabla 6. Contenido de clorofila (mg/m<sup>2</sup>) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	21	28	35	42	49	56	PROMEDIO
días después del trasplante							
<b>100/0</b>	244.00 <sup>A</sup>	390.71 <sup>A</sup>	365.57 <sup>A</sup>	255.14 <sup>A</sup>	257.57 <sup>A</sup>	250.43 <sup>A</sup>	306.64 <sup>AB</sup>
<b>95/5</b>	296.57 <sup>A</sup>	371.57 <sup>A</sup>	275.00 <sup>A</sup>	264.29 <sup>A</sup>	226.86 <sup>A</sup>	267.00 <sup>A</sup>	278.02 <sup>AB</sup>
<b>90/10</b>	271.14 <sup>A</sup>	353.71 <sup>A</sup>	364.57 <sup>A</sup>	292.14 <sup>A</sup>	282.14 <sup>A</sup>	310.14 <sup>A</sup>	310.68 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	270.43 <sup>A</sup>	345.71 <sup>A</sup>	322.00 <sup>A</sup>	272.14 <sup>A</sup>	241.43 <sup>A</sup>	290.29 <sup>A</sup>	297.45 <sup>AB</sup>
<b>80/20</b>	330.43 <sup>A</sup>	367.29 <sup>A</sup>	323.14 <sup>A</sup>	241.71 <sup>A</sup>	265.00 <sup>A</sup>	295.71 <sup>A</sup>	302.32 <sup>AB</sup>
<b>75/25</b>	271.29 <sup>A</sup>	352.86 <sup>A</sup>	320.29 <sup>A</sup>	248.71 <sup>A</sup>	253.29 <sup>A</sup>	310.29 <sup>A</sup>	298.07 <sup>AB</sup>
<b>0/100</b>	288.57 <sup>A</sup>	375.57 <sup>A</sup>	280.29 <sup>A</sup>	215.14 <sup>A</sup>	167.43 <sup>A</sup>	236.86 <sup>A</sup>	267.50 <sup>B</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 7. Contenido de clorofila (mg/m<sup>2</sup>) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	21	28	35	42	49	56	PROMEDIO
días después del trasplante							
100/0	244.00 <sup>B</sup>	390.71 <sup>A</sup>	365.57 <sup>A</sup>	255.14 <sup>AB</sup>	257.57 <sup>A</sup>	250.43 <sup>BC</sup>	306.64 <sup>A</sup>
95/5	296.57 <sup>AB</sup>	371.57 <sup>A</sup>	275.00 <sup>B</sup>	264.29 <sup>AB</sup>	226.86 <sup>AB</sup>	267.0 <sup>ABC</sup>	278.02 <sup>BC</sup>
90/10	271.14 <sup>AB</sup>	353.71 <sup>A</sup>	364.57 <sup>A</sup>	292.14 <sup>A</sup>	282.14 <sup>A</sup>	310.14 <sup>A</sup>	310.68 <sup>A</sup>
85/15	270.43 <sup>AB</sup>	345.71 <sup>A</sup>	322.00 <sup>AB</sup>	272.14 <sup>AB</sup>	241.43 <sup>AB</sup>	290.29 <sup>ABC</sup>	297.45 <sup>AB</sup>
80/20	330.43 <sup>A</sup>	367.29 <sup>A</sup>	323.14 <sup>AB</sup>	241.71 <sup>AB</sup>	265.00 <sup>A</sup>	295.71 <sup>AB</sup>	302.32 <sup>AB</sup>
75/25	271.29 <sup>AB</sup>	352.86 <sup>A</sup>	320.29 <sup>AB</sup>	248.71 <sup>AB</sup>	253.29 <sup>A</sup>	310.29 <sup>A</sup>	298.07 <sup>AB</sup>
0/100	288.57 <sup>AB</sup>	375.57 <sup>A</sup>	280.29 <sup>B</sup>	215.14 <sup>B</sup>	167.43 <sup>B</sup>	236.86 <sup>C</sup>	267.50 <sup>C</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

En general, los valores de las mediciones en el contenido de clorofila, para todas las relaciones de los tratamientos, se encontraron en el rango de 150 a 400 mg/m<sup>2</sup> (Figura 12), los cuales se aproximan a los reportados por He *et al.* (2019) de 120 a 200 mg/m<sup>2</sup> y por Lu *et al.* (2019) de 276 mg/m<sup>2</sup> como valores en plantas sanas de lechuga. La misma figura muestra que, entre los 21 y 28 ddt, en todos los tratamientos aumentó el contenido de clorofila, reflejando el establecimiento del cultivo y su fase de máximo crecimiento vegetativo, donde la actividad fotosintética es más alta. En la primera medición el tratamiento 1 (100/0), representado por la línea negra, mostró el contenido más bajo de clorofila y el tratamiento 5 (80/20), representado por la línea verde, el más alto. A los 28 ddt, se alcanzó un pico máximo, principalmente por la disposición y absorción de nutrientes debido a la primera fertilización; en esta medición todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales (Tablas 6 y 7). Después del pico, entre los 28 y 49 ddt, el contenido de clorofila disminuyó gradualmente en todos los tratamientos; pudo deberse a la senescencia foliar, a una redistribución de nitrógeno de hojas viejas a nuevas o a la insuficiente cantidad de nitrógeno aplicado días antes. A los 56 ddt comenzó a incrementar nuevamente el contenido de clorofila, por la disposición de nutrientes debido a la última aplicación de fertilizantes donde nuevamente el nitrógeno se encontró disponible. Varios tratamientos mostraron una leve recuperación de clorofila,

excepto el 1 (100/0) y el 7 (0/100); este comportamiento podría relacionarse con una liberación lenta del nitrógeno o un rebrote de hojas nuevas. En particular, el tratamiento 7, representado por la línea roja, registró el descenso más drástico de todos los tratamientos hasta los 49 ddt llegando a ser el más bajo; este comportamiento pudo estar influenciado por la liberación lenta de nitrógeno proporcionado por el humus de lombriz, que al inicio no aportó lo suficiente.

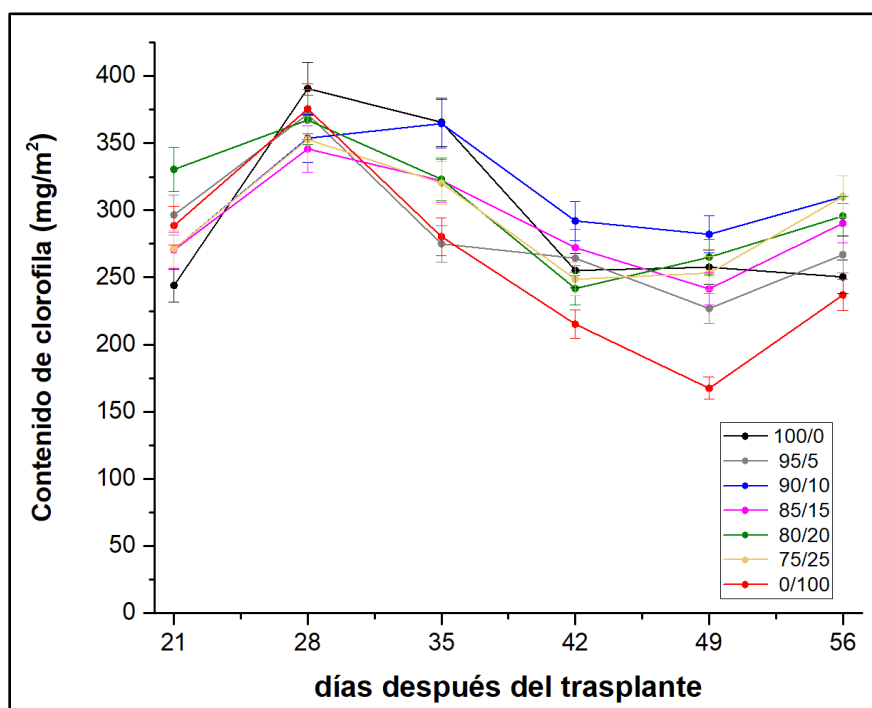


Figura 12. Contenido de clorofila en tejido foliar de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

En plantas de espinaca, Xu y Mou (2016) reportaron tendencias similares, ya que el contenido de clorofila aumentó al aplicar humus de lombriz al 5% y 10%. A medida que aumentaba la duración del periodo de crecimiento, las hojas de lechuga con una alta concentración de fertilizante mineral presentaron valores de contenido de clorofila más altos que aquellas con una baja concentración del mismo. Este comportamiento indica que una alta concentración de fertilizante mineral ayudará a mantener la producción de clorofila durante el crecimiento de la planta.

**Conductancia estomática ( $g_s$ ):** El aparato estomático en las plantas es el mecanismo más importante para controlar la entrada de  $CO_2$  en la hoja y la pérdida de agua. La apertura estomática depende del número, distribución, tamaño, forma y movilidad de los estomas, además de otros factores externos como el aumento de la radiación fotosintéticamente activa, temperatura óptima para la fotosíntesis y aumento de la humedad del aire (Larcher, 2003). De acuerdo con Pino (2019), existe evidencia de que la tendencia es a mayor temperatura foliar mayor conductancia estomática.

Después de realizar la prueba de Tukey, no se detectaron efectos significativos de los tratamientos en los promedios ni en cada una de las mediciones de conductancia estomática (Tabla 8); sin embargo, en términos cuantitativos, la  $g_s$  aumentó alrededor de 30% en los tratamientos 2 al 7 (95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 y 0/100) comparada con los valores obtenidos al aplicar 100/0. Esto puede indicar que el sustrato con abono orgánico redujo la cantidad de agua disponible en el sustrato, lo que se ha explicado por Aguilar *et al.*, (2017), como un efecto provocado por la formación de microporos que incrementan el porcentaje de humedad a punto de marchitez permanente. En la prueba LSD, el tratamiento 100/0 registró los valores más bajos en todo el experimento y en el promedio final ( $P < 0.05$ ), mientras que, el tratamiento 80/20 fue el que evidenció los mayores registros superando en casi 45% al de 100% de fertilizante mineral. (Tabla 9).

Tabla 8. Conductancia estomática ( $g_s$ ) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	21	35	42	56	PROMEDIO
días después del trasplante					
100/0	76.38 <sup>A</sup>	81.81 <sup>A</sup>	89.41 <sup>A</sup>	28.72 <sup>A</sup>	69.08 <sup>A</sup>
95/5	119.00 <sup>A</sup>	115.50 <sup>A</sup>	109.16 <sup>A</sup>	26.11 <sup>A</sup>	92.44 <sup>A</sup>
90/10	116.84 <sup>A</sup>	120.43 <sup>A</sup>	92.18 <sup>A</sup>	62.72 <sup>A</sup>	98.04 <sup>A</sup>
85/15	103.90 <sup>A</sup>	118.66 <sup>A</sup>	107.06 <sup>A</sup>	25.22 <sup>A</sup>	88.71 <sup>A</sup>
80/20	113.70 <sup>A</sup>	119.61 <sup>A</sup>	128.13 <sup>A</sup>	40.05 <sup>A</sup>	100.38 <sup>A</sup>
75/25	123.16 <sup>A</sup>	130.90 <sup>A</sup>	92.22 <sup>A</sup>	33.60 <sup>A</sup>	94.97 <sup>A</sup>
0/100	124.50 <sup>A</sup>	130.94 <sup>A</sup>	103.36 <sup>A</sup>	13.32 <sup>A</sup>	93.03 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 9. Conductancia estomática (gs) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	21	35	42	56	PROMEDIO
días después del trasplante					
<b>100/0</b>	76.38 <sup>B</sup>	81.81 <sup>B</sup>	89.41 <sup>B</sup>	28.72 <sup>A</sup>	69.08 <sup>B</sup>
<b>95/5</b>	119.00 <sup>A</sup>	115.50 <sup>AB</sup>	109.16 <sup>AB</sup>	26.11 <sup>A</sup>	92.44 <sup>AB</sup>
<b>90/10</b>	116.84 <sup>A</sup>	120.43 <sup>A</sup>	92.18 <sup>B</sup>	62.72 <sup>A</sup>	98.04 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	103.90 <sup>AB</sup>	118.66 <sup>A</sup>	107.06 <sup>AB</sup>	25.22 <sup>A</sup>	88.71 <sup>AB</sup>
<b>80/20</b>	113.70 <sup>A</sup>	119.61 <sup>A</sup>	128.13 <sup>A</sup>	40.05 <sup>A</sup>	100.38 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	123.16 <sup>A</sup>	130.90 <sup>A</sup>	92.22 <sup>B</sup>	33.60 <sup>A</sup>	94.97 <sup>AB</sup>
<b>0/100</b>	124.50 <sup>A</sup>	130.94 <sup>A</sup>	103.36 <sup>AB</sup>	13.32 <sup>A</sup>	93.03 <sup>AB</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

De acuerdo con Larcher (2003), los cultivos tienen valores de  $g_s$  entre 400 y 500  $mmol/m^2s$ , mientras que Reyes (2019) reportó un rango entre 300 y 600  $mmol/m^2s$  en condiciones ambientales óptimas para el cultivo de lechuga. También existen valores semejantes reportados para plantas de repollo, entre 300 y 800  $mmol/m^2s$  (Kim *et al.*, 2017). A lo largo del ciclo del cultivo, se presentaron valores entre 13 y 130  $mmol/m^2s$  (Figura 13), los cuales son bajos según los autores antes citados. Esto podría atribuirse a un conjunto de factores como: que sea una característica propia de la variedad cultivada, que la cantidad de estomas o su apertura se redujo al someter a la planta a condiciones de estrés por calor durante el experimento al registrarse temperaturas ambientales máximas de 54.3°C y humedades relativas máximas de hasta 94.8% , a la condición de días nublados durante las mediciones y, a que las mediciones se realizaron solo en las hojas externas, las cuales al final del ciclo de cultivo ya eran senescentes.

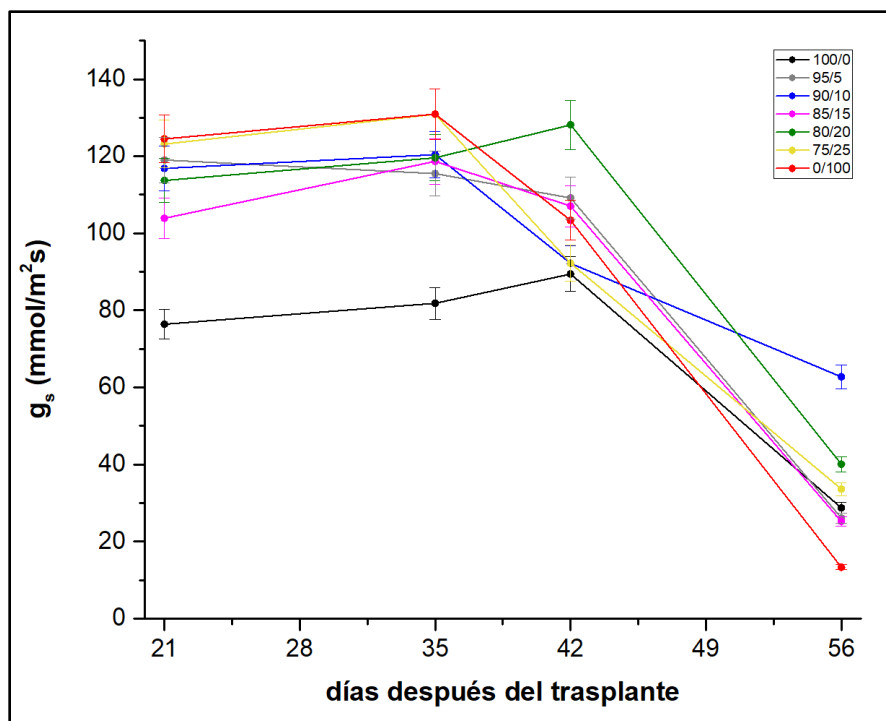


Figura 13. Conductancia estomática en tejido foliar de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

De acuerdo con la figura 13, la conductancia estomática ( $g_s$ ) mostró una tendencia clara a disminuir conforme avanzó el ciclo del cultivo. Durante los primeros 35 días después del trasplante, la mayoría de los tratamientos mantuvieron valores altos y estables (entre 100 y 130  $\text{mmol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ), reflejando una adecuada hidratación y actividad estomática. El tratamiento 1 (100/0), identificado por la línea negra, presentó los valores más bajos desde el inicio, aunque con una disminución más gradual a lo largo del tiempo. A partir de los 42 ddt, todos los tratamientos mostraron un descenso pronunciado de  $g_s$ , acentuándose entre los 49 y 56 ddt, etapa en la que el tratamiento 7 (0/100), señalado con la línea roja, registró la mayor caída, alcanzando el valor mínimo observado. Esta reducción general en la conductancia estomática podría estar relacionada con el avance fenológico del cultivo, la disminución de la disponibilidad de nitrógeno, y las condiciones climáticas de la temporada en la que se realizó el experimento, que favorecen un estrés hídrico progresivo. Los tratamientos combinados mantuvieron una conductancia alta en

la etapa temprana, pero no lograron evitar la caída final, indicando que la mezcla de fuentes de fertilización mejora la respuesta fisiológica inicial pero no garantiza la estabilidad estomática en las fases tardías.

**Eficiencia Fotosintética (Fv/Fm):** Se refiere al rendimiento máximo fotosintético y se relaciona directamente con la fuente del suministro de nitrógeno a la planta, por lo que la fotosíntesis es afectada por la disponibilidad de nitrógeno y por la radiación (Lara, 2019).

No se presentaron efectos estadísticamente significativos en los promedios ni en las mediciones de cada uno de los tratamientos de la eficiencia fotosintética con la prueba de Tukey (Tabla 10); aunque la relación 100/0 (tratamiento 1) presentó los valores más bajos Fv/Fm. El rango reportado por algunos autores de Fv/Fm en plantas de lechuga sanas y no estresadas oscila entre 0.65 y 0.85 (Lara *et al.*, 2020; He, 2019). Sin embargo, se sabe que valores inferiores a 0.69 en plantas cultivadas indican estrés por factores abióticos, principalmente déficit de humedad y de nitrógeno. Con base en esto último, se asume que las plantas del experimento no presentaron estrés ligado a nutrición.

Al aplicar la prueba LSD de Fisher (Tabla 11) en el muestreo a los 21 ddt, la proporción 90/10 fue superior en un 165% al tratamiento 100/0 ( $P < 0.05$ ) que registró el menor valor; así mismo, a los 56 ddt la diferencia entre el tratamiento 90/10 y el 75/25 fue del 5% ( $P < 0.05$ ), que fueron los registros extremos. Se identificaron variaciones puntuales al inicio (21 ddt) y al final (56 ddt) del ciclo de cultivo, en donde todos los tratamientos presentaron los valores más altos de eficiencia fotosintética. No obstante, estas diferencias no se reflejaron en el promedio general, lo que sugiere que las variaciones fueron transitorias y que, bajo las condiciones del invernadero entre los meses junio y agosto, la eficiencia fotosintética de las plantas de lechuga no se vio significativamente afectada por la fuente de fertilización y los valores están asociados a la fase fenológica del cultivo.

Tabla 10. Eficiencia fotosintética (Fv/Fm) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	21	35	42	56	PROMEDIO
<b>días después del trasplante</b>					
<b>100/0</b>	0.67 <sup>A</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.66 <sup>A</sup>	0.76 <sup>A</sup>	0.681 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	0.74 <sup>A</sup>	0.63 <sup>A</sup>	0.67 <sup>A</sup>	0.77 <sup>A</sup>	0.706 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	0.78 <sup>A</sup>	0.64 <sup>A</sup>	0.68 <sup>A</sup>	0.78 <sup>A</sup>	0.725 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	0.77 <sup>A</sup>	0.64 <sup>A</sup>	0.64 <sup>A</sup>	0.77 <sup>A</sup>	0.710 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	0.76 <sup>A</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.77 <sup>A</sup>	0.713 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	0.77 <sup>A</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.67 <sup>A</sup>	0.75 <sup>A</sup>	0.715 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	0.77 <sup>A</sup>	0.60 <sup>A</sup>	0.66 <sup>A</sup>	0.77 <sup>A</sup>	0.704 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 11. Eficiencia fotosintética (Fv/Fm) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	21	35	42	56	PROMEDIO
<b>días después del trasplante</b>					
<b>100/0</b>	0.67 <sup>B</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.66 <sup>A</sup>	0.76 <sup>AB</sup>	0.681 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	0.74 <sup>AB</sup>	0.63 <sup>A</sup>	0.67 <sup>A</sup>	0.77 <sup>AB</sup>	0.706 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	0.78 <sup>A</sup>	0.64 <sup>A</sup>	0.68 <sup>A</sup>	0.78 <sup>A</sup>	0.725 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	0.77 <sup>A</sup>	0.64 <sup>A</sup>	0.64 <sup>A</sup>	0.77 <sup>AB</sup>	0.710 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	0.76 <sup>AB</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.77 <sup>AB</sup>	0.713 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	0.77 <sup>A</sup>	0.65 <sup>A</sup>	0.67 <sup>A</sup>	0.75 <sup>A</sup>	0.715 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	0.77 <sup>A</sup>	0.60 <sup>A</sup>	0.66 <sup>A</sup>	0.77 <sup>B</sup>	0.704 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

En la Figura 14, la Fv/Fm mostró una dinámica clara a lo largo del ciclo de cultivo. En la fase inicial (21 ddt), los valores de la mayoría de los tratamientos fueron altos (entre 0.74–0.78). Aunque el tratamiento 1 (100/0), indicado con la línea negra, presentó el valor menor. A los 35 ddt se observó una disminución generalizada en todos los tratamientos, siendo más pronunciada en el tratamiento 7 (0/100), marcado con la línea roja; lo que sugiere un mayor nivel de estrés en esta etapa, posiblemente asociado a la liberación lenta de nutrientes después de la primera fertilización. Hacia los 56 ddt, la Fv/Fm se recuperó en todos los tratamientos, alcanzando valores cercanos o superiores a 0.78, con mejor respuesta en los tratamientos 3 y 2 (90/10 y 95/5).

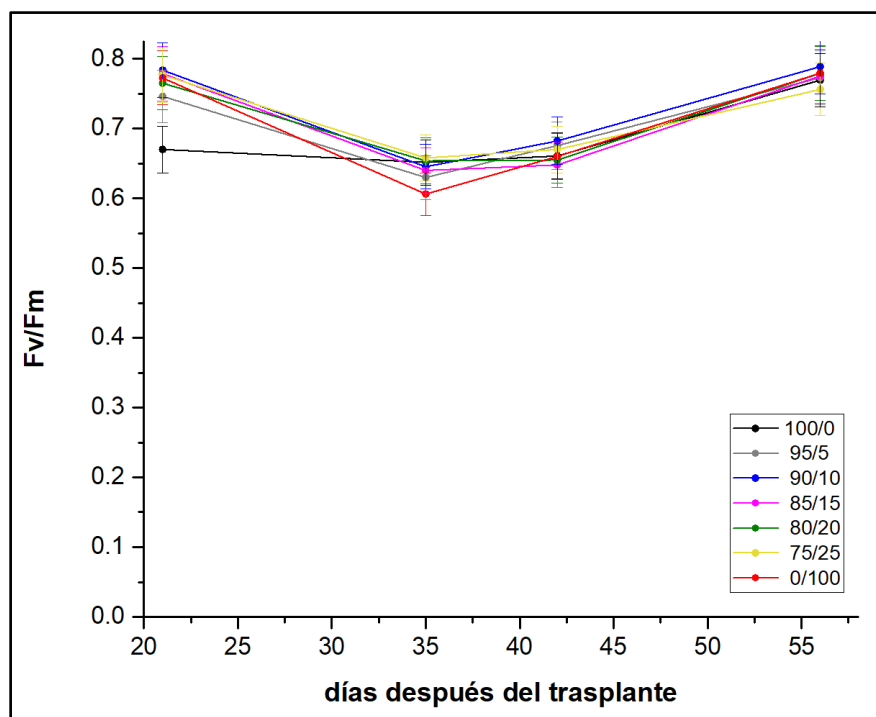


Figura 14. Eficiencia fotosintética en tejido foliar de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

Estos resultados indican que, cuando las plantas se encontraban en desarrollo sufrieron menos estrés que en las fases de adaptación y senescencia, al inicio y final del ciclo de cultivo.

**Contenido de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ):** No se encontraron efectos significativos por el contenido de nitratos (Tabla 12), sin embargo, la relación 75/25 presentó la mayor cantidad (5100 ppm), mientras que la relación 85/15 (2550) la menor; lo que indica una alta variabilidad en los datos que no permitió identificar diferencias estadísticas. Esta variabilidad llama la atención ya que nos advierte que, con un mismo tratamiento, la planta puede o no acumular nitratos en su tejido. Sin embargo, al aplicar el análisis de diferencia mínima significativa fue posible identificar diferencias estadísticamente significativas (Tabla 13). Particularmente, el tratamiento 4 (85/15) presentó una menor acumulación de nitratos al final del ciclo y en el promedio, diferenciándose significativamente de los tratamientos con relación de 75/25 y 95/5, que registraron las mayores concentraciones.

Esta tendencia sugiere que, combinaciones con mayor proporción de fertilización orgánica, como el tratamiento 4, podrían presentar una mineralización más lenta o menos eficiente del nitrógeno, lo que se reflejaría en una menor concentración de nitratos en los tejidos foliares. Por otro lado, tratamientos con mayor proporción de fertilizante mineral mostraron una mayor acumulación de nitratos, posiblemente debido a la rápida disponibilidad del nitrógeno inorgánico. Estos resultados son relevantes, ya que el contenido de nitratos en hoja está relacionado con la calidad del producto y su inocuidad para el consumo humano, por lo que el manejo balanceado de fuentes orgánicas y minerales podría ser clave para mantener niveles adecuados sin comprometer el rendimiento ni la salud del consumidor.

Al respecto, Bian *et al.*, (2020) explican que, la absorción, traslocación y asimilación de nitratos en las hortalizas son procesos estrechamente regulados por la interacción de factores internos (expresión de genes y actividad enzimática) y factores ambientales externos (humedad, temperatura y nutrientes). Los mismos autores sugieren que el estrés térmico en área foliar y en raíz inhibe la función de la enzima nitrato reductasa y puede resultar en una disfunción en los mecanismos de asimilación; una alta temperatura en la zona radicular se ha asociado con acumulación excesiva de nitratos.

Tabla 12. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Inicio</b>	<b>Final</b>	<b>PROMEDIO</b>
<b>100/0</b>	3300 <sup>A</sup>	3367 <sup>A</sup>	3333 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	2900 <sup>A</sup>	5933 <sup>A</sup>	4417 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	2866 <sup>A</sup>	4100 <sup>A</sup>	3483 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	3066 <sup>A</sup>	2033 <sup>A</sup>	2550 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	4533 <sup>A</sup>	3367 <sup>A</sup>	3950 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	3900 <sup>A</sup>	6300 <sup>A</sup>	5100 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	2733 <sup>A</sup>	2900 <sup>A</sup>	2817 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 13. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Inicio</b>	<b>Final</b>	<b>PROMEDIO</b>
<b>100/0</b>	3300 <sup>A</sup>	3367 <sup>AB</sup>	3333 <sup>AB</sup>
<b>95/5</b>	2900 <sup>A</sup>	5933 <sup>A</sup>	4417 <sup>AB</sup>
<b>90/10</b>	2866 <sup>A</sup>	4100 <sup>AB</sup>	3483 <sup>AB</sup>
<b>85/15</b>	3066 <sup>A</sup>	2033 <sup>B</sup>	2550 <sup>B</sup>
<b>80/20</b>	4533 <sup>A</sup>	3367 <sup>AB</sup>	3950 <sup>AB</sup>
<b>75/25</b>	3900 <sup>A</sup>	6300 <sup>A</sup>	5100 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	2733 <sup>A</sup>	2900 <sup>AB</sup>	2817 <sup>B</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

En la Figura 15, se aprecia variabilidad en el contenido de nitratos entre tratamientos desde el inicio del experimento, correspondiente a la primera medición; lo que se puede atribuir al método empleado para el muestreo y posiblemente a las características propias de la planta de lechuga, tal y como se menciona en el trabajo de

Ollúa *et al.* (2016), donde concluyen que el factor genético influye en el contenido de nitratos en lechuga producida en invernadero comercial. Particularmente, la concentración de nitratos en el tejido vegetal puede ser distinta según la hoja seleccionada para el muestreo debido a que las hojas jóvenes, maduras o en senescencia muestran diferencias fisiológicas que influyen en la acumulación de los nitratos. Relacionado a esto, las diferencias individuales entre plantas, atribuidas al modelo biológico, pueden provocar capacidades distintas para absorber, movilizar y almacenar nitratos, incluso cuando todo el cultivo se desarrolló bajo las mismas condiciones ambientales y mismo manejo agronómico.

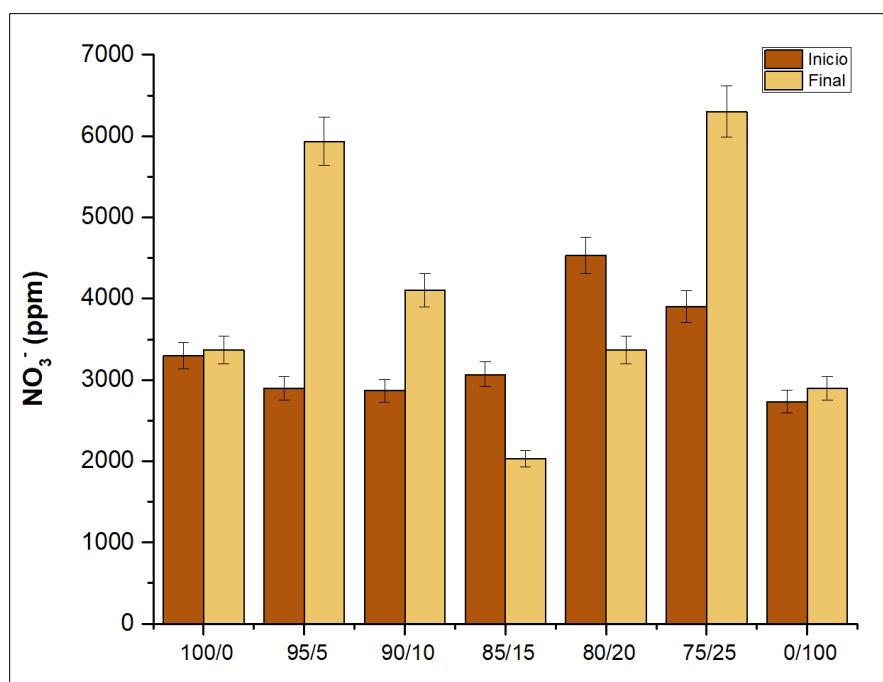


Figura 15. Contenido de nitratos en savia del cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

Llama la atención que, en los tratamientos extremos 1 (100/0) y 7 (0/100) se mantuvieron niveles bajos y estables de nitratos. En el tratamiento completamente mineral se puede atribuir a que, el nitrato se metabolizó en compuestos orgánicos para

la producción de biomasa, por lo que no quedo acumulado en el tejido. En contraste, en la fertilización completamente orgánica se aporta menos nitrógeno, cuya disponibilidad es lenta durante el ciclo de cultivo, reduciendo su bioacumulación.

Las normas europeas (EC, 2011) determinan que, el límite máximo permitido de concentración de nitratos en lechuga cultivada en invernadero es de 4500 ppm, y las relaciones 95/5 y 75/25 al final del cultivo superan el límite (Figura 15). Esto pudo suceder por una temperatura ambiental de hasta 54.3 °C por las tardes, durante la mayor parte del ciclo del cultivo, que pudo propiciar una elevada evapotranspiración incentivando una mayor demanda de azúcares y, al mismo tiempo, disminuir la síntesis de proteínas, por lo que el nitrato no fue transformado en aminoácidos (Croitoru *et al.*, 2015). Este resultado también sugiere que, con estas combinaciones se generaron condiciones particulares en el sustrato como una menor densidad aparente que permitió mayor desarrollo de la raíz y, por consecuencia mayor absorción de nutrientes. Una menor densidad aparente en el sustrato y mayor proporción de raíces implica un consumo mayor de agua, lo que incide en estrés hídrico que afecta el metabolismo del nitrato y su bioacumulación.

Nuestros hallazgos nos conducen a recomendar incluir en futuras investigaciones variables como medición de nitrato reductasa, temperatura en suelo y hoja, y llevar un control más exigente en el contenido de humedad en el sustrato. Durante el experimento se identificó que, el riego (cantidad y periodicidad) varían mucho entre tratamientos, ya que las mezclas con abono orgánico mantienen la humedad del suelo por más tiempo, pero eso no implica que hay suficiente humedad disponible para la planta.

En general, los resultados evidencian que la acumulación de nitratos no solo depende de la cantidad de fertilizante aplicado, sino también de su fuente, del momento de aplicación, de la sincronización con las fases de desarrollo del cultivo, y de las condiciones ambientales. Por tanto, un manejo adecuado de la fertilización, que considere tanto la calidad del insumo como las necesidades fisiológicas de la planta y condiciones climáticas, es clave para evitar la acumulación excesiva de nitratos en el producto final, preservando la calidad nutricional y la seguridad alimentaria.

**Peso fresco y diámetro ecuatorial:** No se detectaron efectos significativos por las diferentes relaciones de los tratamientos en las variables de rendimiento con la prueba de Tukey (Tabla 14). No obstante, la prueba LSD detectó diferencias significativas por efecto de los tratamientos en el peso fresco (Tabla 15). A excepción del tratamiento 6 (75/25), que fue diferente ( $P < 0.05$ ) a la fertilización 100% mineral, en el resto de las combinaciones de fertilizantes no se registraron diferencias ( $P > 0.05$ ). Esta diferencia del 60% sugiere que el uso de diferentes proporciones de fertilizante orgánico y mineral podría haber limitado el desarrollo vegetativo del cultivo, posiblemente debido a una disponibilidad más lenta de nutrientes (propia de la fuente orgánica) o a procesos de mineralización que no están sincronizados con la demanda del cultivo.

Ambas pruebas coinciden en que no hubo diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, se observó una tendencia general en la que los tratamientos con mayor proporción de fertilización mineral mostraron valores ligeramente superiores en comparación con los tratamientos más orgánicos.

Tabla 14. Variables de rendimiento del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Peso fresco (g)</b>	<b>Diámetro ecuatorial (cm)</b>	<b>Rendimiento (g/planta)</b>
<b>100/0</b>	155.64 <sup>A</sup>	31.76 <sup>A</sup>	22.23 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	123.17 <sup>A</sup>	30.97 <sup>A</sup>	17.59 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	117.71 <sup>A</sup>	30.44 <sup>A</sup>	16.82 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	145.56 <sup>A</sup>	29.91 <sup>A</sup>	20.79 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	132.44 <sup>A</sup>	30.89 <sup>A</sup>	18.92 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	97.72 <sup>A</sup>	28.22 <sup>A</sup>	13.96 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	133.15 <sup>A</sup>	30.33 <sup>A</sup>	19.02 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 15. Variables de rendimiento del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Peso fresco (g)</b>	<b>Diámetro ecuatorial (cm)</b>	<b>Rendimiento (g/planta)</b>
<b>100/0</b>	155.64 <sup>A</sup>	31.76 <sup>A</sup>	22.23 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	123.17 <sup>AB</sup>	30.97 <sup>A</sup>	17.59 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	117.71 <sup>AB</sup>	30.44 <sup>A</sup>	16.82 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	145.56 <sup>AB</sup>	29.91 <sup>A</sup>	20.79 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	132.44 <sup>AB</sup>	30.89 <sup>A</sup>	18.92 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	97.72 <sup>B</sup>	28.22 <sup>A</sup>	13.96 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	133.15 <sup>AB</sup>	30.33 <sup>A</sup>	19.02 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Los resultados obtenidos para el peso fresco y el diámetro ecuatorial del cultivo de lechuga revelan una clara influencia de los tratamientos de fertilización aplicados. En el caso del peso fresco (Figura 16A), se observa una tendencia general donde los tratamientos con mayor proporción de fertilizante mineral (particularmente el tratamiento 1) promovieron una mayor acumulación de biomasa, alcanzando el valor más alto (155.64 g). A medida que se incrementó la proporción de fertilización orgánica, el peso fresco tendió a disminuir, y el tratamiento 6 (75/25) fue el que produjo un 30% menos de biomasa y el menor tamaño (97.72 g). Sin embargo, es importante destacar que el tratamiento con fertilización totalmente orgánica (0/100) presentó un peso fresco relativamente alto (133.15 g), superado sólo en un 16% por la fertilización totalmente mineral; lo cual podría indicar un efecto favorable del humus de lombriz bajo las condiciones de manejo.

Estos resultados fueron inferiores a los obtenidos en el trabajo realizado por Neri *et al.* (2017), quien utilizó humus de lombriz con una dosis de 203 g/planta y se obtuvo un peso de 140 g. En cuanto al diámetro ecuatorial, éste fue influenciado por los

tratamientos con fertilización mineral (31.76 cm), al igual que lo reportado por Rasche *et al.* (2025) con dosis similares a la fertilización empleada. El tratamiento con fertilización orgánica presentó un valor de 30.33 cm, rango aceptable para el mercado; el cual fue superior al obtenido también por Neri *et al.* (2017).

La variable menos afectada fue el diámetro ecuatorial, indicando que todas las lechugas crecieron prácticamente lo mismo; sin embargo, la variable de peso fresco tiene una mayor amplitud numérica y es una variable más dependiente de los tratamientos de fertilización. Los factores que inciden en el peso fresco principalmente son la hidratación, al ser una hortaliza con gran porcentaje de agua, y la nutrición que favorece a la formación de una estructura más fibrosa. La literatura indica que la lechuga romana presenta un contenido hídrico muy alto, específicamente un rango entre 93% y 95% (Tibbits & Bottenberg, 1976; Shi *et al.*, 2022).

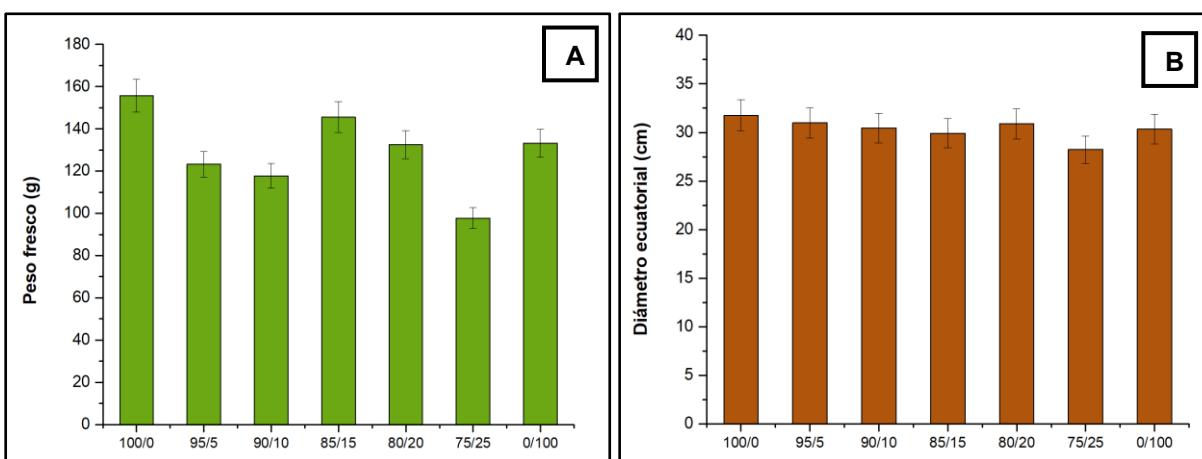


Figura 16. Variables de rendimiento del cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. (A) peso fresco y (B) diámetro ecuatorial. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

El rendimiento y la calidad de los cultivos de hortalizas está estrechamente relacionado con las condiciones de estrés hídrico y calórico (Nemeskéri & Helyes, 2019); por lo que las condiciones ambientales y la disposición para acumular nitratos impactó en que no existiera una tendencia en los diferentes tratamientos. Estos resultados

sugieren que, bajo las condiciones del experimento, las diferentes proporciones de fertilización mineral y orgánica incidieron en el desarrollo y la turgencia del producto final. Además, los datos obtenidos indican que la sustitución parcial o total de fertilización mineral por fertilización orgánica en lechuga es factible, aunque numéricamente el tratamiento con 100 % de fertilización mineral tuvo el valor promedio de rendimiento más alto (22.23 g/planta), fue similar al obtenido con 100% de fertilización orgánica (19.02 g/planta).

Estos resultados permiten inferir que, si bien la sustitución parcial de fertilización mineral por humus de lombriz es viable en términos agronómicos, es importante considerar el equilibrio entre fuentes de fertilización, etapas fenológicas del cultivo y condiciones ambientales, tomando en cuenta que el cultivo es de ciclo corto. En particular, proporciones como 75/25 podrían requerir un ajuste en dosis o momento de aplicación para incrementar el rendimiento.

**pH y Conductividad eléctrica del suelo:** No se encontraron diferencias significativas en los promedios ni en las mediciones puntuales de pH (Tablas 16 y 17) en las dos pruebas estadísticas realizadas. El pH del suelo se mantuvo estable durante el ciclo de cultivo de lechuga, con valores entre 6.2 y 6.6 (Figura 17A), mismos que caen dentro del rango adecuado para la disponibilidad de nutrientes en el suelo y su asimilación por las plantas. Se observó una ligera disminución alrededor de los 35 ddt en todos los tratamientos, posiblemente relacionada con procesos de mineralización y actividad microbiana.

Tabla 16. pH en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	21	28	35	42	56	PROMEDIO
días después del trasplante						
<b>100/0</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.43 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.2 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.49 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.2 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.39 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	6.3 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.39 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	6.5 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.49 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.41 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.2 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.40 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 17. pH en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	21	28	35	42	56	PROMEDIO
días después del trasplante						
<b>100/0</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.43 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.2 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.49 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.2 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.39 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	6.3 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.39 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	6.5 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.49 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.41 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.2 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.40 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

En cuanto a la conductividad eléctrica, al hacer la prueba de medias por Tukey, no se encontraron diferencias significativas en los muestreos a los 21 y 42 ddt. Sin embargo, a los 35 ddt la proporción 95/5 superó ( $P < 0.05$ ) en 26% a las proporciones 0/100, 75/25 y 80/20, las cuales registraron los valores más bajos. Además, a los 56 ddt

la proporción 75/25 fue superada ( $P < 0.05$ ) en un 58% por la combinación 80/20; mientras que en el promedio final la proporción 75/25 fue superada y diferente ( $P < 0.05$ ) en 58% por el tratamiento 95/5, mismo que registró el mayor parámetro (Tabla 18). Los valores se mantuvieron entre 0.3 y 1.1 dS/m, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, estos valores descartan la posible acumulación de sales (Figura 17B). Se identificó un descenso inicial hasta los 35 ddt seguido de un incremento hacia el final del ciclo. El tratamiento 2 (95/5) mostró el pico más alto de conductividad eléctrica, lo que sugiere acumulación de sales derivadas de la fertilización mineral, mientras que el tratamiento 7 (0/100) presentó los valores más bajos y estables, evidenciando una liberación lenta de nutrientes y menor riesgo de salinización.

Estos resultados indican que la combinación de fertilización mineral y orgánica modula el comportamiento químico del suelo, manteniéndolo en condiciones adecuadas para el desarrollo de la lechuga sin alterar drásticamente su pH y con un manejo controlado de la conductividad eléctrica.

Tabla 18. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>21</b>	<b>35</b>	<b>42</b>	<b>56</b>	<b>PROMEDIO</b>
	<b>días después del trasplante</b>				
<b>100/0</b>	0.74 <sup>A</sup>	0.64 <sup>AB</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.81 <sup>AB</sup>	0.68 <sup>AB</sup>
<b>95/5</b>	0.82 <sup>A</sup>	1.02 <sup>A</sup>	0.48 <sup>A</sup>	0.74 <sup>AB</sup>	0.76 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	0.70 <sup>A</sup>	0.59 <sup>AB</sup>	0.49 <sup>A</sup>	0.76 <sup>AB</sup>	0.63 <sup>AB</sup>
<b>85/15</b>	0.80 <sup>A</sup>	0.58 <sup>AB</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.88 <sup>AB</sup>	0.70 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	0.74 <sup>A</sup>	0.46 <sup>B</sup>	0.49 <sup>A</sup>	0.99 <sup>A</sup>	0.67 <sup>AB</sup>
<b>75/25</b>	0.58 <sup>A</sup>	0.47 <sup>B</sup>	0.37 <sup>A</sup>	0.52 <sup>B</sup>	0.48 <sup>B</sup>
<b>0/100</b>	0.70 <sup>A</sup>	0.43 <sup>B</sup>	0.45 <sup>A</sup>	0.62 <sup>AB</sup>	0.55 <sup>AB</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 19. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	21	35	42	56	PROMEDIO
	<b>días después de trasplante</b>				
<b>100/0</b>	0.74 <sup>A</sup>	0.64 <sup>B</sup>	0.54 <sup>AB</sup>	0.81 <sup>AB</sup>	0.68 <sup>AB</sup>
<b>95/5</b>	0.82 <sup>A</sup>	1.02 <sup>A</sup>	0.48 <sup>AB</sup>	0.74 <sup>ABC</sup>	0.76 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	0.70 <sup>A</sup>	0.59 <sup>B</sup>	0.49 <sup>AB</sup>	0.76 <sup>ABC</sup>	0.63 <sup>AB</sup>
<b>85/15</b>	0.80 <sup>A</sup>	0.58 <sup>B</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.88 <sup>AB</sup>	0.70 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	0.74 <sup>A</sup>	0.46 <sup>B</sup>	0.49 <sup>AB</sup>	0.99 <sup>A</sup>	0.67 <sup>AB</sup>
<b>75/25</b>	0.58 <sup>A</sup>	0.47 <sup>B</sup>	0.37 <sup>B</sup>	0.52 <sup>C</sup>	0.48 <sup>B</sup>
<b>0/100</b>	0.70 <sup>A</sup>	0.43 <sup>B</sup>	0.45 <sup>AB</sup>	0.62 <sup>BC</sup>	0.55 <sup>AB</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

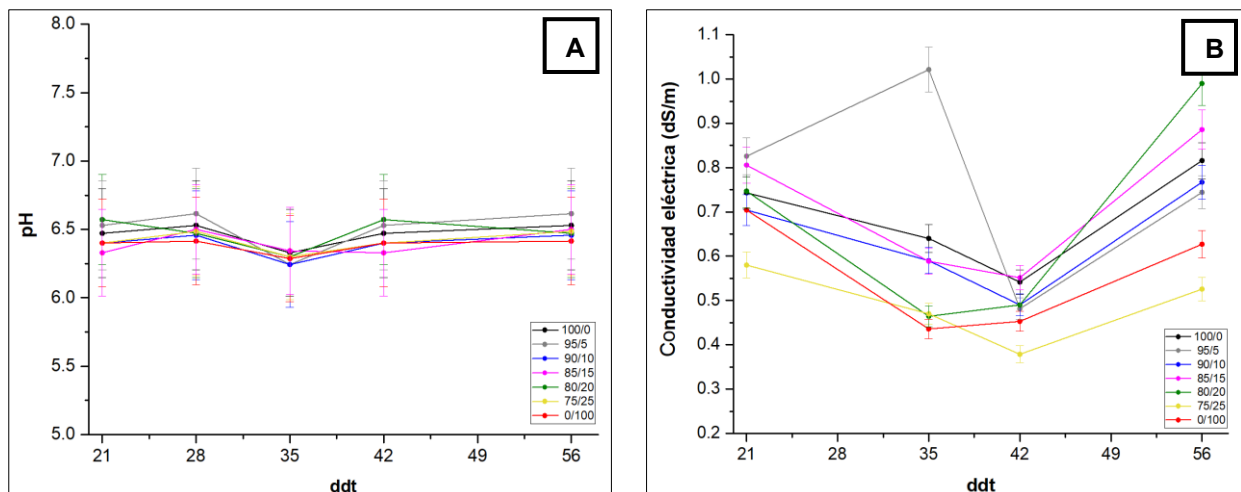


Figura 17. pH (A) y conductividad eléctrica (B) del suelo del cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

Tabla 20. Parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	pH	Conductividad eléctrica (dS/m)	Materia orgánica (%)	Contenido de nitratos NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
<b>100/0</b>	2.13 <sup>A</sup>	7.01 <sup>D</sup>	0.91 <sup>E</sup>	3.13 <sup>A</sup>	65 <sup>E</sup>
<b>95/5</b>	1.63 <sup>A</sup>	7.18 <sup>C</sup>	2.11 <sup>A</sup>	3.71 <sup>A</sup>	477 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	2.10 <sup>A</sup>	7.19 <sup>C</sup>	0.96 <sup>CDE</sup>	1.92 <sup>A</sup>	143 <sup>BC</sup>
<b>85/15</b>	1.40 <sup>A</sup>	7.31 <sup>B</sup>	1.11 <sup>BC</sup>	2.23 <sup>A</sup>	180 <sup>B</sup>
<b>80/20</b>	1.87 <sup>A</sup>	7.27 <sup>BC</sup>	0.95 <sup>DE</sup>	3.48 <sup>A</sup>	113 <sup>CDE</sup>
<b>75/25</b>	1.43 <sup>A</sup>	7.26 <sup>BC</sup>	1.12 <sup>B</sup>	2.23 <sup>A</sup>	80 <sup>DE</sup>
<b>0/100</b>	1.17 <sup>A</sup>	7.51 <sup>A</sup>	1.09 <sup>BCD</sup>	3.79 <sup>A</sup>	130 <sup>BCD</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=3$

Los parámetros físicos y químicos del suelo se midieron al inicio (Tabla 4) y al final del cultivo (Figura 18). De acuerdo con la prueba de Tukey realizada, no hubo diferencias significativas en la densidad aparente (Tabla 20), sin embargo, la prueba de Fisher arrojó diferencias significativas (Tabla 21). En la Figura 18A se observa que todos los tratamientos tienen valores mayores a 1.02 g/cm<sup>3</sup> al final del cultivo. Especialmente, el tratamiento 7 (0/100) presentó una menor densidad aparente; contribuyendo a mejorar la estructura del suelo con mayor proporción de fertilizante orgánico.

Tabla 21. Parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de lechuga a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	pH	Conductividad eléctrica (dS/m)	Materia orgánica (%)	Contenido de nitratos NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
<b>100/0</b>	2.13 <sup>A</sup>	7.01 <sup>E</sup>	0.91 <sup>C</sup>	3.13 <sup>A</sup>	65 <sup>E</sup>
<b>95/5</b>	1.63 <sup>AB</sup>	7.18 <sup>D</sup>	2.11 <sup>A</sup>	3.71 <sup>A</sup>	477 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	2.10 <sup>A</sup>	7.19 <sup>CD</sup>	0.96 <sup>C</sup>	1.92 <sup>A</sup>	143 <sup>BC</sup>
<b>85/15</b>	1.40 <sup>AB</sup>	7.31 <sup>B</sup>	1.11 <sup>B</sup>	2.23 <sup>A</sup>	180 <sup>B</sup>
<b>80/20</b>	1.87 <sup>AB</sup>	7.27 <sup>B</sup>	0.95 <sup>C</sup>	3.48 <sup>A</sup>	113 <sup>CD</sup>
<b>75/25</b>	1.43 <sup>AB</sup>	7.26 <sup>BC</sup>	1.12 <sup>B</sup>	2.23 <sup>A</sup>	80 <sup>DE</sup>
<b>0/100</b>	1.17 <sup>B</sup>	7.51 <sup>A</sup>	1.09 <sup>B</sup>	3.79 <sup>A</sup>	130 <sup>C</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD, p≤0.05), n=3

Con respecto a la materia orgánica, no se encontraron efectos significativos con las dos pruebas estadísticas realizadas (Tablas 20 y 21), lo que puede atribuirse a la alta variabilidad de los datos. Tampoco se identificó la tendencia esperada correlacionando valores más altos de materia orgánica en el sustrato a mayor proporción de fertilización orgánica. Al respecto se sabe que, la dinámica del carbono orgánico está determinada por factores bióticos y abióticos, no solo por la cantidad de carbono. Con lo anterior, se asume que, algunas condiciones del sustrato como temperatura y humedad promovieron una mayor actividad biológica y respiración del suelo, generando mayor pérdida de carbono.

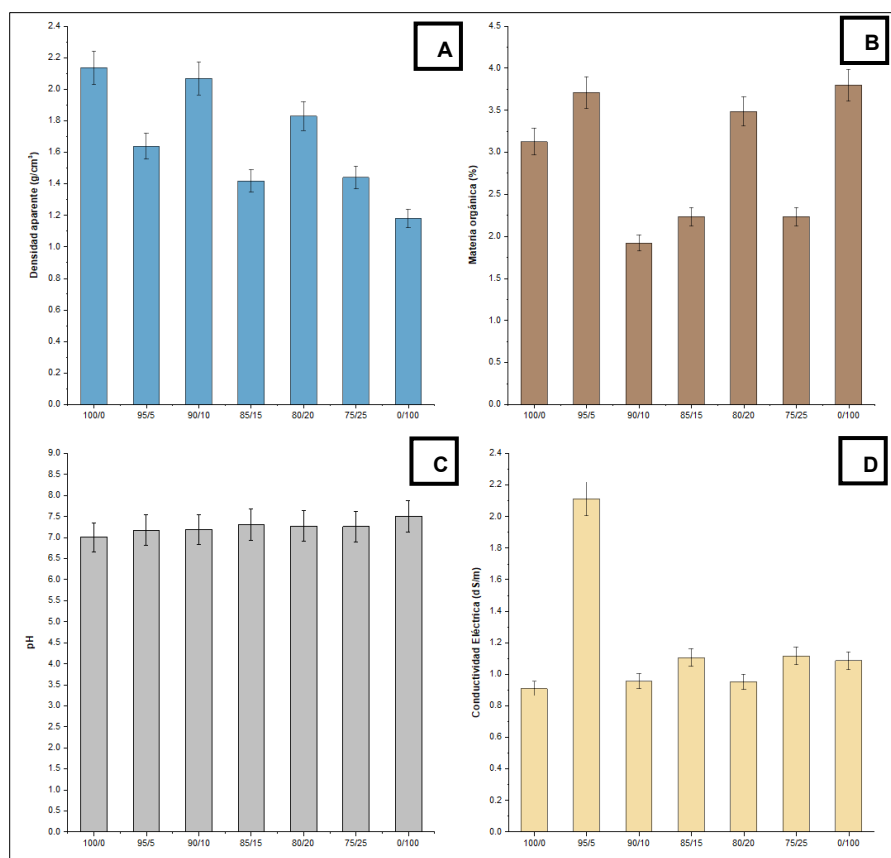


Figura 18. Parámetros físicos y químicos del suelo al final del ciclo de cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Densidad aparente (A), materia orgánica (B), pH (C) y conductividad eléctrica (D). Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

Cuantitativamente, el contenido de materia orgánica del suelo se redujo en todos los tratamientos en comparación con su valor inicial (5.63%). Aunque no se identificó literatura que reporte una disminución en materia orgánica por efecto de fertilización mineral y orgánica en lechuga u otros cultivos hortícolas, se infiere que, las altas temperaturas registradas durante el ciclo de cultivo favorecieron la oxidación de carbono y pérdida de materia orgánica, como lo indican Navarro *et al.*, 2021.

Los tratamientos 2, 7 y 5 mantuvieron los niveles más elevados de materia orgánica, 3.79 %, 3.71 % y 3.48 % respectivamente (Figura 18B); lo que evidencia que

la incorporación de abonos orgánicos contribuyó a retener carbono en el suelo y así menos pérdida de materia orgánica entre los diferentes tratamientos. Por el contrario, los tratamientos con mayor proporción de fertilizante mineral (100/0) y los que combinaron dosis intermedias de orgánico y mineral (90/10, 85/15 y 75/25) presentaron las reducciones más notorias de materia orgánica, probablemente a causa de una mineralización acelerada promovida por el nitrógeno y la rápida descomposición del material orgánico aplicado. Estos resultados indican que, tanto la calidad de la fuente orgánica como el equilibrio con la fertilización mineral son factores clave para la preservación de la materia orgánica en el suelo. Se resalta que, el método de determinación de materia orgánica es indirecto y cualitativo, teniendo como referencia el contenido de carbono orgánico por titulación colorimétrica. Lo anterior puede implicar un sesgo del observador en la medición.

En el pH se encontraron diferencias significativas con la prueba de Tukey y LSD. El pH inicial del suelo (7.91) disminuyó en todos los tratamientos, aunque en distinta magnitud. El tratamiento con solo fertilización mineral (100/0) mostró la mayor reducción (7.01), lo que refleja el efecto acidificante de la fuente de nitrógeno mineral, especialmente durante la nitrificación. A medida que se incrementó la proporción de fertilización orgánica, el pH tendió a estabilizarse, destacando el tratamiento 0/100, que conservó el pH más alto (7.51). Esto sugiere que los abonos orgánicos aportaron compuestos que contrarrestaron parcialmente la acidificación inducida por la fuente mineral (Figura 18C). La conductividad eléctrica también presentó efectos significativos en ambas pruebas estadísticas (Tabla 20), su valor inicial fue de 1.6 dS/m, el cual disminuyó en la mayoría de los tratamientos, lo que indica la probabilidad de que las sales solubles fueron absorbidas por el cultivo o se lixiviaron con el riego. El tratamiento 2 (95/5) mostró un incremento (2.11 dS/m), probablemente debido a una acumulación de sales derivadas del alto aporte mineral y una pequeña proporción orgánica. Los tratamientos con mayor fertilización orgánica (0/100, 75/25, 85/15) mantuvieron valores intermedios de conductividad eléctrica de 1.09 a 1.12 dS/m, lo que sugiere una liberación más equilibrada de nutrientes sin acumulaciones excesivas.

La figura 19 muestra el efecto de los tratamientos en el contenido de nitratos en suelo al final del cultivo, donde se encontraron diferencias significativas (Tablas 20 y 21). Se observa una variación muy marcada entre tratamientos, la relación 95/5 registró la mayor acumulación de nitratos (477 ppm), siendo el único tratamiento que duplica el contenido inicial de nitratos en suelo (222.4 ppm). En contraste, los tratamientos con solo fertilización mineral (100/0) y mayor proporción de fertilización orgánica (75/25) presentaron los valores más bajos de nitratos (65 y 80 ppm, respectivamente), lo que sugiere una mayor absorción del nitrógeno por la lechuga o pérdidas por lixiviación o volatilización. Los tratamientos con mayor aporte de materia orgánica (80/20, 75/25 y 0/100) mostraron una liberación más lenta y estable del nitrógeno, reduciendo el riesgo de acumulaciones excesivas en el suelo.

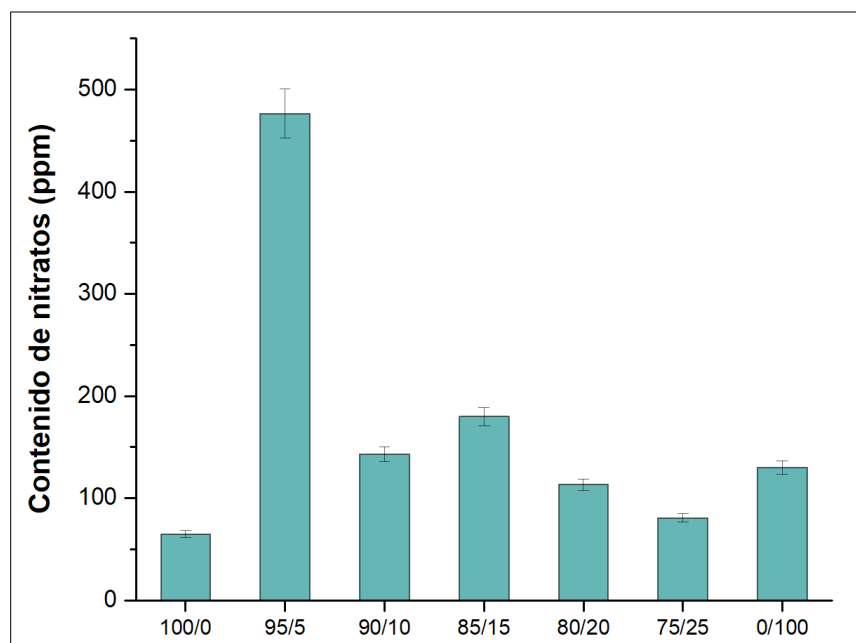


Figura 19. Contenido de nitratos en el suelo al final del ciclo de cultivo de lechuga a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

El análisis de contrastes ortogonales se realizó en variables medidas en planta y en suelo; los resultados se presentan en la Tabla 22. Para el contenido de clorofila, la fertilización mineral influyó significativamente en el contenido de clorofila, mientras que la orgánica y mixta mostraron comportamientos similares entre sí. La conductancia estomática se vio afectada entre la fertilización mineral y orgánica tratamientos mientras que la eficiencia fotosintética y el pH del sustrato se mantuvieron estables independientemente del tipo de fertilización aplicada. El contenido de nitratos fue influenciado mayormente por la fertilización mineral en comparación con la orgánica y mixta. La conductividad eléctrica del sustrato fue la variable más influenciada por el tipo de fertilización, mostrando evidencia de las diferentes concentraciones de sales entre tratamientos todos los tratamientos.

Tabla 22. Contrastes ortogonales realizados para evaluar el efecto de los tratamientos sobre diferentes variables en el cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
	Mineral	Mineral	Orgánica	Mineral
	vs	vs	vs	por
	Orgánica	Mixta	Mixta	Orgánica
	Valor p			
<b>Contenido de clorofila</b>	<b>0.0122</b>	<b>0.0117</b>	0.9654	<b>0.0105</b>
<b>Conductancia estomática</b>	0.0682	0.0825	0.5812	<b>0.0284</b>
<b>Eficiencia fotosintética</b>	0.5528	0.2006	0.5881	0.5810
<b>Contenido de nitratos</b>	<b>0.0170</b>	<b>0.0401</b>	0.2304	<b>0.0266</b>
<b>pH</b>	0.9246	0.6664	0.5716	0.8610
<b>Conductividad eléctrica</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0003</b>	<b>0.0001</b>

\*  $p \leq 0.05$  indica diferencias significativas

\* Los valores significativos se destacan en negritas

## 1.4 Conclusiones

Con base en las variables fisiológicas, durante el ciclo de cultivo las plantas estuvieron sanas y funcionales. Sin embargo, las condiciones experimentales con temperaturas máximas de 54.3°C y humedades relativas mínimas de 12.5%, combinado con las características propias del cultivo y la época de siembra generaron efectos de covariables en el metabolismo del nitrógeno y el desarrollo de las plantas, que no se midieron.

Las fuentes y combinaciones de fertilización modificaron significativamente el contenido de nitratos en planta y suelo, sin una tendencia creciente o decreciente correlacionada. A pesar de lo anterior, la fertilización mixta representa una estrategia eficiente para mantener niveles de nitratos en hoja que cumplen con límites establecidos por normativas internacionales, sin comprometer el rendimiento. Además, el corto ciclo productivo de la lechuga pudo explicar la ausencia de una respuesta significativa a la fertilización orgánica.

El contenido de clorofila, la conductancia estomática y la eficiencia fotosintética mostraron tendencias asociadas al suministro de nitrógeno, reflejando un mejor desempeño fisiológico en tratamientos con un balance adecuado entre fertilización orgánica y mineral.

En cuanto a las variables del suelo, como el pH, la conductividad eléctrica y la densidad aparente, las variaciones por efecto de tratamiento fueron mínimas, manteniéndose en rangos óptimos para el desarrollo del cultivo. En contraparte, el contenido de materia orgánica y nitratos fue afectado por variables como humedad y temperatura.

En general, los resultados indican que la fertilización mineral puede mejorar características fisiológicas y al mismo tiempo incrementar la acumulación de sales y nitratos en el suelo; lo cual debe considerarse en el manejo sostenible y la calidad del cultivo de lechuga.

Resulta destacable que muchas investigaciones relacionadas reportan altos coeficientes de correlaciones positivas. Mientras que, bajo las condiciones experimentales de esta investigación surgieron muchas inquietudes acerca de todos los

procesos ecológicos y metabólicos que son condicionados por la temperatura y humedad y que aún no se han discutido ampliamente en la literatura de enfoque sistémico de la fertilización integral.

## 1.5 Literatura citada

Aguilar, G., Peña, C., Castro, R., Lara, J., Cruz, E., & Rojas, A. (2017). Efecto del vermicompost y estrés hídrico en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.): *Parámetros productivos y relaciones hídricas*. 86, 28-39.

Azcón Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal* (Segunda). Mc GrawHill.

Barbaro, L., Karlanian, M., & Mata, D. (2014). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas.

Bian, Z., Wang, Y., Zhang, X., Li, T., Grundy, S., Yang, Q., & Cheng, R. (2020). A review of environment effects on nitrate accumulation in leafy vegetables grown in controlled environments. *Foods*, 9(6), 732.

Castellanos, J., Uvalle, J. & Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas.

Esteban, A. (2009). Influencia de distintos tratamientos fertilizantes sobre la evolución del contenido de nitratos en un cultivo de lechuga. In *XXXVII Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura: Almería, 2007* (pp. 795-804). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Croitoru, M., Muntean, D., Fülöp, I. & Modroiu, A. (2015). Growing patterns to produce 'nitrate-free' lettuce (*Lactuca sativa*). *Food Additives & Contaminants: Part A*, 32(1), 80-86.

Diario Oficial de la Unión Europea (2011). Contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios. No 1881/2006. *Official Journal of the European Union* 320:15-17.

García, J., Troyo, E., Murillo, B., Flores, A., & González, A. (2001). Efecto de algunos insecticidas y un promotor de crecimiento sobre variables fisiológicas y el rendimiento de tomate *Lycopersicon esculentum* L. cv. Río Grande. *AGROCHIMICA-PISA*-, 45(5/6), 189-198.

Guillén, O., Rojas, N., Alcalá, J., Loredó, C., Ramírez, H., Bertolini, V. & Rodríguez, J. (2023). Nanocompuesto de Nitrógeno como Fertilizante de Liberación Lenta en Columnas de Suelo con Plantas de Lechuga. *Terra Latinoamericana*, 41.

He, J., Qin, L., & Chow, W. S. (2019). Impacts of LED spectral quality on leafy vegetables: Productivity closely linked to photosynthetic performance or associated with leaf traits?. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(6), 16-25.

Ibarra, D., Ruiz, J., González, D., Flores, J. & Díaz Padilla, G. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura técnica en México*, 35(3), 267-276.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). [Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional San Luis Potosí](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia_hist/1_250_000/serie%20II/702825235673.pdf)  
[https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia\\_hist/1\\_250\\_000/serie%20II/702825235673.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia_hist/1_250_000/serie%20II/702825235673.pdf)

INTAGRI. (2017). La conductividad eléctrica del suelo en el desarrollo de los cultivos. *Serie suelos*. Núm. 26. Artículos técnicos de INTAGRI. México. 5 p.

INTAGRI. (2018). Disponibilidad de nutrimentos y el pH del suelo. *Nutrición Vegetal*. Núm. 113. Artículos técnicos de INTAGRI. México. 4 p.

Jiménez, J. (1989). Análisis de suelos y su interpretación. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*, 49, 75-89.

Kim, S., Lee, H., Mun, B., & Lee, S. (2017). Effect of soil water content on growth, photosynthetic rate, and stomatal conductance of Kimchi cabbage at the early growth stage after transplanting. *Journal of Bio-Environment Control*, 26(3), 151-157.

Lara, A., Rojas, A., Ramírez, H., Alcalá, J., Méndez, H. & Romero, M. (2020). Respuesta fotosintética de lechuga hidropónica a relaciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en verano y otoño. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(4A), 565-573.

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer Science & Business Media.

Li, P., Sun, Z., Yang, Y., Lu, M., Li, H., Yan, H., ... & Song, Y. (2024). Determining optimal nitrogen concentration intervals throughout lettuce growth using fluorescence parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 226, 109438.

Limantara, L., Dettling, M., Indrawati, R., & Brotosudarmo, T. H. P. (2015). Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables. *Procedia Chemistry*, 14, 225-231.

Lora, R., Pulido, I., Méndez, A., & Peña, F. (2006). Efecto de la fertilización orgánica y mineral en rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un suelo typic hapludalfs de mediana fertilidad. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 9(1), 107-116. <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/e15a06b7-0550-450a-aa69-4f59fa43723d/content>

Lu, F., Bu, Z., & Lu, S. (2019). Estimating chlorophyll content of leafy green vegetables from adaxial and abaxial reflectance. *Sensors*, 19(19), 4059.

Molina, E. (2007). Análisis de suelos y su interpretación. *San José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International*.

Moreno, D., Campos, D. & Cisneros, R. (2004). Estadística Climatológica del Observatorio Meteorológico de San Luis Potosí (1877-2000) (Primera). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Navarro, J., Almendro, M. & Zorpas, A. (2021). The increase of soil organic matter reduces global warming, myth or reality?. *Sci*, 3(1), 18.

Nemeskéri, E., & Helyes, L. (2019). Physiological responses of selected vegetable crop species to water stress. *Agronomy*, 9(8), 447.

Osorio, N. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*, 1(4), 1-4.

Pino, E., Montalván, I., Vera, A., & Ramos, L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 37(4), 55-64.

Quintero, M., González, C., & Guzmán, J. (2011). Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. *Flórez R., VJ (ed). Sustratos, Manejo del Clima, Automatización y Control en Sistemas de Cultivo sin Suelo. Universidad Nacional de Bogotá. Colombia. pp, 79-108.*

Reyes, A., Fraile D. & Álvarez, J. (2019). Evaluación de la mezcla de sustratos en un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. Verónica. *Temas agrarios*, 24(1), 34-41.

Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de iniciación científica*, 4, 101-105.

Salgado, S., Palma, D., Lagunes, J., & Castelán-Estrada, M. (2006). Manual para el muestreo de suelos plantas y aguas e interpretación de análisis. *Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco-ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco, México*, 90.

Sanclemente, M. A., & Peña, E. J. (2008). Crecimiento y eficiencia fotosintética de *Ludwigia decurrens* Walter (Onagraceae) bajo diferentes concentraciones de nitrógeno. *Acta biológica colombiana*, 13(1), 175-186.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2011). Fertilización en el cultivo de lechuga en Guanajuato. En *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. INIFAP.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020). *Lechuga*.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). *Panorama agroalimentario 2023*.

Shi, M., Gu, J., Wu, H., Rauf, A., Emran, T., Khan, Z. & Suleria, H. A. (2022). Phytochemicals, nutrition, metabolism, bioavailability, and health benefits in lettuce—A comprehensive review. *Antioxidants*, 11(6), 1158.

Slamet, W., Purbajanti, E. D., Darmawati, A., & Fuskhah, E. (2017). Leaf area index, chlorophyll, photosynthesis rate of lettuce (*Lactuca sativa* L) under N-organic fertilizer. *Indian Journal of Agricultural Research*, 51(4), 365-369.

Tibbitts, T. & Bottenberg, G. (1976). Growth of lettuce under controlled humidity levels<sup>1</sup>. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 101(1), 70-73.

Xu, C., & Mou, B. (2016). Vermicompost affects soil properties and spinach growth, physiology, and nutritional value. *HortScience*, 51(7), 847-855.

## Capítulo 2. Efecto de la fertilización integral en reacciones fisiológicas, rendimiento, contenido de nitratos y calidad de futo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.)

### 2.1 Introducción

El cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero constituye una de las actividades agrícolas más relevantes e importantes en México, tanto por su valor alimentario como económico. Por volumen de producción y exportación, México es un país que se posiciona como uno de los principales productores y exportadores de jitomate con un rendimiento promedio de 74 toneladas por hectárea en una superficie cosechada de 49 mil hectáreas y más de 3 millones de toneladas de producción. En los últimos quince años la producción de jitomate se ha incrementado en un 95.8%, y es debido a la producción que se está dando en agricultura protegida (SAP, 2023).

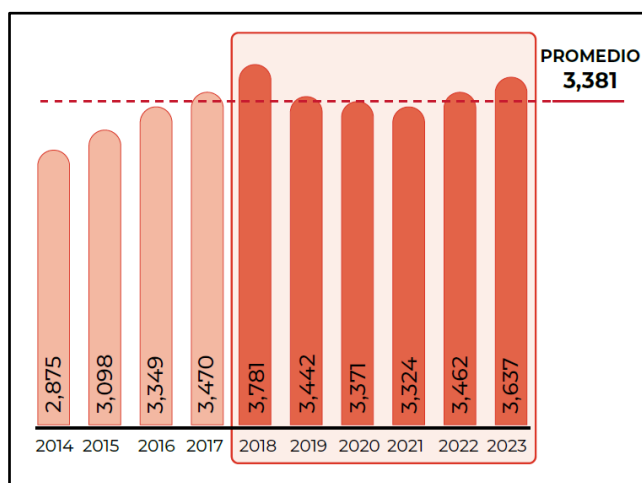


Figura 20. Volumen de producción nacional de jitomate en miles de toneladas

Nota. Imagen tomada de *Panorama Agroalimentario 2024*, por SIAP, 2025, <https://panorama.agricultura.gob.mx/vista/panorama-agroalimentario.php>

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2023, los principales estados productores fueron Sinaloa con 712,013 toneladas (19.6%), San Luis Potosí con 436,097 toneladas (12.1%), Michoacán con 356,776

toneladas (9.8%), Jalisco con 211,716 toneladas (5.8%) y Morelos con 201,721 toneladas (5.5%); los cuales concentraron el 52.8% de la producción nacional.

La superficie cosechada en México de jitomate en invernadero fue de 8,293.21 hectáreas, con valor de producción de 14,751,688.56 miles de millones de pesos y un rendimiento de 178.90 ton/hectárea; mientras que a cielo abierto fue de 33,445.23 hectáreas cosechadas, con una producción de 11,029,530.28 miles de millones de pesos y un rendimiento de 38.89 ton/ha. El rendimiento de jitomate en invernadero supera en casi 500% a la producción a cielo abierto; además, aunque la superficie cultivada es cuatro veces mayor a cielo abierto, el valor de la producción es muy similar. En 2022, según las estadísticas mencionadas, San Luis Potosí aportó con más del 12% de la producción nacional de jitomate, ocupando el segundo lugar en volumen de producción (SIAP, 2023).

La palabra jitomate proviene del náhuatl xictli (ombligo) y tomatl (tomate), originándose en Sudamérica (Pérez & Castro, 2011). Su distribución abarca desde los Andes sudamericanos a través de Perú hasta el norte de Chile y en las Islas Galápagos; posteriormente fue distribuido hacia México, donde fue domesticado (Urrieta *et al.*, 2012; Pérez *et al.*, 2020). El jitomate es la hortaliza de fruto de ciclo largo que más se cosecha en México, es una planta herbácea perenne que pertenece a la familia de las solanáceas y es cultivada como anual. Existen variedades de crecimiento determinado e indeterminado.

Su sistema de raíces es pivotante, denso y con gran cantidad de ramificaciones secundarias en los primeros 30 cm del suelo y en los primeros 20 cm se concentra el 70% de su biomasa radical. Su tallo es anguloso, pubescente, con algunos pelos glandulares; al principio de su ciclo biológico su consistencia es herbácea y en estado adulto es leñoso. Las hojas son simples y alternas con una longitud de 10 a 25 cm; en las axilas de las hojas del tallo principal surgen los tallos secundarios. Las flores son hermafroditas de 1 a 2 cm de largo y color amarillo brillante dispuestas en cimas axilares, cada una de las cuales lleva de cinco a seis flores (Pérez & Castro, 2011); se

encuentran agrupadas en inflorescencia de racimo o cimas racimosas (SIAP, 2020). El fruto es una baya carnosa de tonos que van del amarillento al rojo de forma generalmente redonda y achatada (Calzada, 2017).

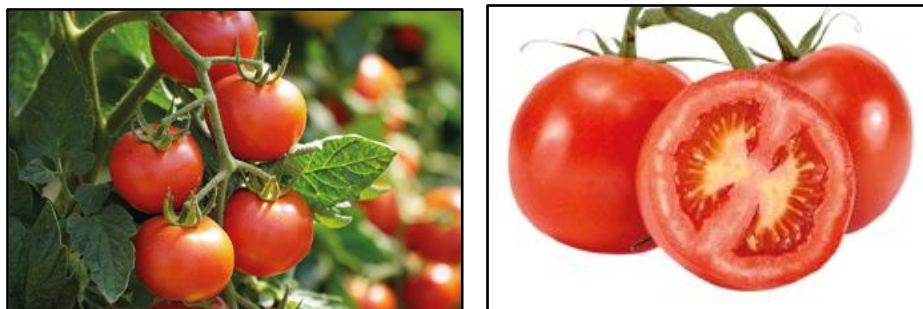


Figura 21. Jitomate

Nota. Imágenes tomadas de *Panorama Agroalimentario 2024*, por SIAP, 2025, [https://nube.agricultura.gob.mx/panorama\\_siap/](https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_siap/)

Desde el punto de vista nutricional, el jitomate es altamente valorado por su contenido en compuestos antioxidantes, como caroteno y licopeno, así como por su aporte de vitaminas A y C, minerales, fibra dietética y bajo contenido calórico (Raffo *et al.*, 2002; Intagri, 2017). Según SIAP (2023), su consumo anual per cápita es de 12.7 kg y sus propiedades lo convierten en un alimento fundamental en la dieta diaria y en un producto con alta demanda en los mercados nacional e internacional.

La etapa de germinación o emergencia se da de 0 a 7 días después de siembra (dds), la etapa de crecimiento vegetativo 35 días después de trasplante (ddt), del trasplante a cosecha se dan 90 días en jitomates indeterminados y 52 días al primer corte, la etapa de floración a partir de los 35 ddt, en la etapa de fructificación el amarre y llenado de fruto desde 45 ddt, la cosecha desde los 90 ddt y la etapa de senescencia a partir de 150 ddt. Los niveles óptimos de luz del cultivo de jitomate varían de acuerdo con la etapa de desarrollo de la planta, desde el momento del trasplante hasta la aparición del primer racimo floral las necesidades de luz van de 40,000 a 50,000 luxes; y desde la floración hasta la maduración de frutos se requieren más de 60,000 luxes (Pérez & Castro, 2011). La temperatura óptima para el cultivo oscila entre 12°C y 30°C en función de cada una de sus etapas fenológicas, la humedad relativa óptima va del

60% al 75% en suelos con textura areno-limosa a franco, suficiente aireación, materia orgánica mínimo de 2.5% y pH de 5.5 a 7.0 (Jasso *et al.*, 2012; SAGARPA, 2013).

El uso de fertilizantes químicos ofrece una disponibilidad inmediata de nutrientes y permite un manejo preciso de las dosis; no obstante, su aplicación inadecuada puede generar efectos adversos, tales como la acumulación de sales en el sustrato, la contaminación de cuerpos de agua y la disminución de la calidad del fruto. En contraste, la fertilización orgánica, aunque presenta una liberación más lenta de nutrientes, promueve la mejora de las propiedades físicas y biológicas del suelo, estimula la actividad microbiana y contribuye a una menor huella ambiental. En este contexto, el uso de estrategias de fertilización integrada, que combinen de forma racional ambos enfoques, constituye una alternativa viable para avanzar hacia sistemas de producción sostenibles, eficientes y ambientalmente responsables. La fertilización en el cultivo de jitomate es uno de los factores clave que influye tanto en el rendimiento como en la calidad, particularmente en sistemas intensivos como los invernaderos.

Los fertilizantes químicos permiten una absorción rápida de nutrientes; sin embargo, un uso inadecuado puede provocar problemas como la acumulación de sales en el suelo, la contaminación de cuerpos de agua y una reducción en la calidad del fruto. Según Leyva *et al.* (2005), hay investigaciones que demuestran una mayor acumulación de nitratos en frutos que en hojas debido a las malas prácticas de fertilización. Al ser una hortaliza de fruto consumida por el ser humano, existen normas que dictan el nivel máximo permisible de nitratos en jitomate fresco; en Rusia no deben sobrepasar las 300 ppm (García *et al.*, 2023).

Por otro lado, los fertilizantes orgánicos liberan los nutrientes de manera más lenta, ayudando a mejorar las características físicas y biológicas del suelo, además de favorecer la actividad de los microorganismos y generar un menor impacto ambiental. En este sentido, otro de los objetivos de este trabajo es conocer los efectos de la fertilización orgánica y mineral en el cultivo de jitomate como una opción efectiva para

avanzar hacia modelos de cultivo más sostenibles, productivos y responsables con el ambiente.

## 2.2 Materiales y Métodos

El experimento se estableció en un invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad de 60 m<sup>2</sup> en el Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Figura 22). Su ubicación es a 22° 07' 37" LN y 100° 56' 39" LO, a 1,866 metros sobre el nivel del mar. Su temperatura media anual es de 17.4°C y su precipitación total anual de 392.5 mm, por lo que predomina un clima seco templado con lluvia en verano (Moreno *et al.*, 2004).



Figura 22. Invernadero utilizado para el establecimiento del cultivo de jitomate

Se planteó un diseño completamente al azar y se utilizó semilla certificada de la variedad Zhoé de tipo saladette indeterminada; la unidad experimental fue una maceta con 14 kg de tierra y una planta (Figura 23). El experimento se realizó en los meses de agosto de 2024 a enero de 2025.



Figura 23. Unidad experimental del cultivo de jitomate

Se recolectó material de los primeros 20 cm de profundidad de un suelo de tipo leptosol, de una parcela en descanso (Figura 24), ubicada en la comunidad de Los López, en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (22° 13' 43" LN y 101° 04' 31" LO, a 2,000 m.s.n.m. (INEGI, 2013).

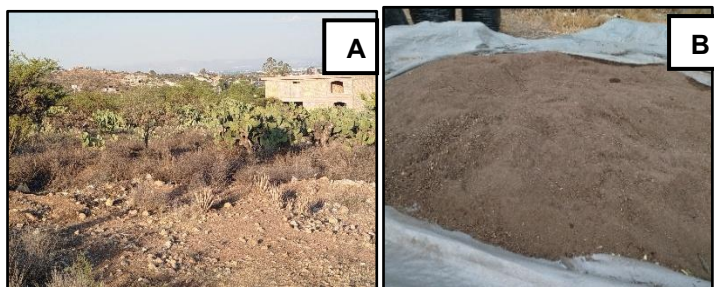


Figura 24. Suelo agrícola de parcela en descanso (A) en el sitio, (B) homogeneizado para el cultivo de jitomate

### Caracterización de suelo y agua

Las propiedades físicas y químicas iniciales y finales del suelo utilizado fueron analizadas en el área de laboratorio de Ecología Vegetal del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, con base en la NOM-021-RECNAT-2000. Para el riego se utilizó agua de la red pública de suministro de agua potable cuyas propiedades para uso agrícola fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Nutrición FERTILAB®.

## Manejo del cultivo

### Trasplante

El trasplante se realizó en bolsas de polietileno de 20 L con 14 kg de tierra cada una. Un día antes del trasplante, éste se llevó a capacidad de campo. Se colocaron las plántulas en el centro de las bolsas a una profundidad de 15 cm.

### Riego

El riego se realizó de forma manual, de acuerdo con las necesidades diarias del cultivo, todos los días desde el trasplante hasta la cosecha. El requerimiento del riego fue determinado por el sustrato, las condiciones de temperatura y el desarrollo de la planta.

### Entutorado

Se realizó a las 5 semanas después del trasplante (ddt) por el tipo de crecimiento de este cultivo, que es de hábito indeterminado. Se utilizaron anillos y rafia para sostener cada una de las plantas y ganchos para guiarlas.

### Poda

Durante el ciclo de cultivo se realizaron podas de brotes laterales y de hojas cada semana para mantener las plantas limpias y permitir suficiente aireación en los frutos. Las hojas más viejas y los brotes que se desarrollaron en la base de las axilas de las hojas del tallo principal se eliminaron cuando tenían una longitud de 5 cm, utilizando tijeras previamente desinfectadas.

### Polinización

Se realizó dos veces por semana mediante movimiento mecánico, golpeando la rafia que sostenía a cada planta. Además, se utilizaron ventiladores dentro del invernadero para generar movimiento del aire.

### Fertilización

Se determinó que la dosis óptima de nitrógeno para el cultivo de jitomate en la región es de 250 kg/ha; ésta se encuentra en un rango de 2.1 a 3.8 kilogramos por tonelada de cosecha (Castellanos, 2009). Esa cantidad se ajustó considerando el aporte de nitrógeno del suelo y el agua a utilizar en el experimento. Una vez realizado el ajuste, se calculó la cantidad de fertilizante para siete tratamientos de fertilización (Tabla 23), donde las relaciones de fertilizante mineral y fertilizante orgánico (FM/FO) fueron 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 y 0/100, con siete repeticiones cada una.

Tabla 23. Tratamientos de fertilización orgánica y mineral en cultivo de jitomate y cantidad de fertilizante aplicado (g)

	<b>Fertilizante mineral (%)</b>	<b>Fertilizante orgánico (%)</b>
<b>T1</b>	100 (40.0 g)	0 (0 g)
<b>T2</b>	95 (32.9 g)	5 (30 g)
<b>T3</b>	90 (25.8 g)	10 (60 g)
<b>T4</b>	85 (18.7 g)	15 (90 g)
<b>T5</b>	80 (11.6 g)	20 (120 g)
<b>T6</b>	75 (4.5 g)	25 (150 g)
<b>T7</b>	0 (0.0 g)	100 (600 g)

Los fertilizantes utilizados fueron nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), nitrato de calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ), fosfato monopotásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), nitrato de magnesio ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ), cloruro de potasio ( $\text{KCl}$ ), quelato de hierro, quelato de manganeso, quelato de zinc, quelato de magnesio como fuente mineral, los cuales se aplicaron una vez por semana; y humus de lombriz de Green Forest® como fuente orgánica aplicado en una sola dosis a los 15 ddt.

Para cubrir posibles deficiencias de microelementos se aplicó Bayfolan® cada semana a todos los tratamientos.

### Monitoreo de plagas y prevención de enfermedades

Se colocaron trampas amarillas de 30 x 30 cm distribuidas aleatoriamente dentro del invernadero para el monitoreo de insectos plaga. (Figura 25).



Figura 25. Ubicación de trampas dentro del invernadero y desarrollo del cultivo

Los insectos encontrados fueron mosquita blanca (*Bemisia tabaci*), la cual es capaz de transmitir virus que se replican al interior del cuerpo del insecto al alimentarse de plantas infectadas que inocula partículas de los virus al alimentarse de plantas sanas (Vázquez et al., 2022), y gusanos que perforan las hojas para alimentarse de la savia y de los frutos comiéndose el tejido interno (Figura 26); por lo que fueron necesarias aspersiones de control. Se aplicó, de manera foliar, insecticida a base de extracto de chicalote (*Argemone mexicana*) en una dosis de 2 L/ha.



Figura 26. Insectos encontrados en algunas plantas de jitomate

Con respecto a las enfermedades, algunas plantas presentaron algunos síntomas de cenicilla (*Leveillula taurica*), hongo que se manifiesta por manchas con crecimiento polvoriento de color blanco y gris que con el tiempo se vuelven de color amarillento (Vázquez et al., 2022). Para combatirla se aplicó de manera foliar fungicida y bactericida a base de extracto de gobernadora (*Larrea tridentata*) en una dosis de 5 L/200 L de agua.

### Cosecha

La primera cosecha se realizó a los 105 días ddt, cuando el fruto presentó un color rojo intenso, como se muestra en la figura 27. Se midieron las variables correspondientes de los tres primeros racimos por planta

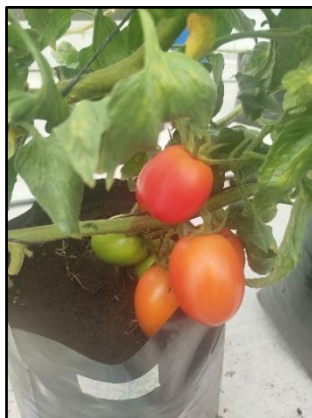


Figura 27. Frutos de jitomate listos para cosechar

### **Variables determinadas en el cultivo de jitomate**

Se determinaron las variables fisiológicas contenido de clorofila, conductancia estomática ( $g_s$ ) y eficiencia fotosintética ( $F_v/F_m$ ) en planta, y contenido de nitratos ( $NO_3^-$ ) en savia. Las variables de rendimiento fueron: número de frutos y peso fresco. En calidad se registró diámetro ecuatorial, grados Brix y contenido de nitratos ( $NO_3^-$ ) en fruto. En el suelo se dio seguimiento a los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, materia orgánica y contenido de nitratos ( $NO_3^-$ ) en suelo. En la Tabla 24 se presentan las variables fisiológicas, de rendimiento y de calidad registradas en diferentes momentos del ciclo del cultivo.

Tabla 24. Variables, equipo y periodicidad de medición en planta de jitomate

	<b>Equipo de medición</b>	<b>Periodicidad</b>
<b>Variables Fisiológicas</b>		
Contenido de clorofila mg/m <sup>2</sup>	Medidor portátil de clorofila (CCM-300, OPTI-SCIENCES)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Conductancia estomática (g <sub>s</sub> ) mmol/m <sup>2</sup> s	Porómetro (SC-1 METER Group, DECAGON DEVICES)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Eficiencia fotosintética (Fv/Fm)	Medidor de fluorescencia de clorofila (OS30P+, OPTI-SCIENCES)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Contenido de nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) ppm	Medidor selectivo de iones (LAQUATWIN, HORIBA)	Al inicio, mitad y final del ciclo de cultivo
<b>Variables de rendimiento y calidad</b>		
Número de frutos	Conteo manual	Cosecha
Peso fresco G	Balanza electrónica de precisión (VELAB)	Cosecha
Diámetro ecuatorial Cm	Cinta métrica flexible	Cosecha
Grados Brix %	Refractómetro digital grados Brix de alta precisión (SOONDA)	Cosecha
Contenido de nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) Ppm	Medidor selectivo de iones (LAQUATWIN, HORIBA)	Cosecha

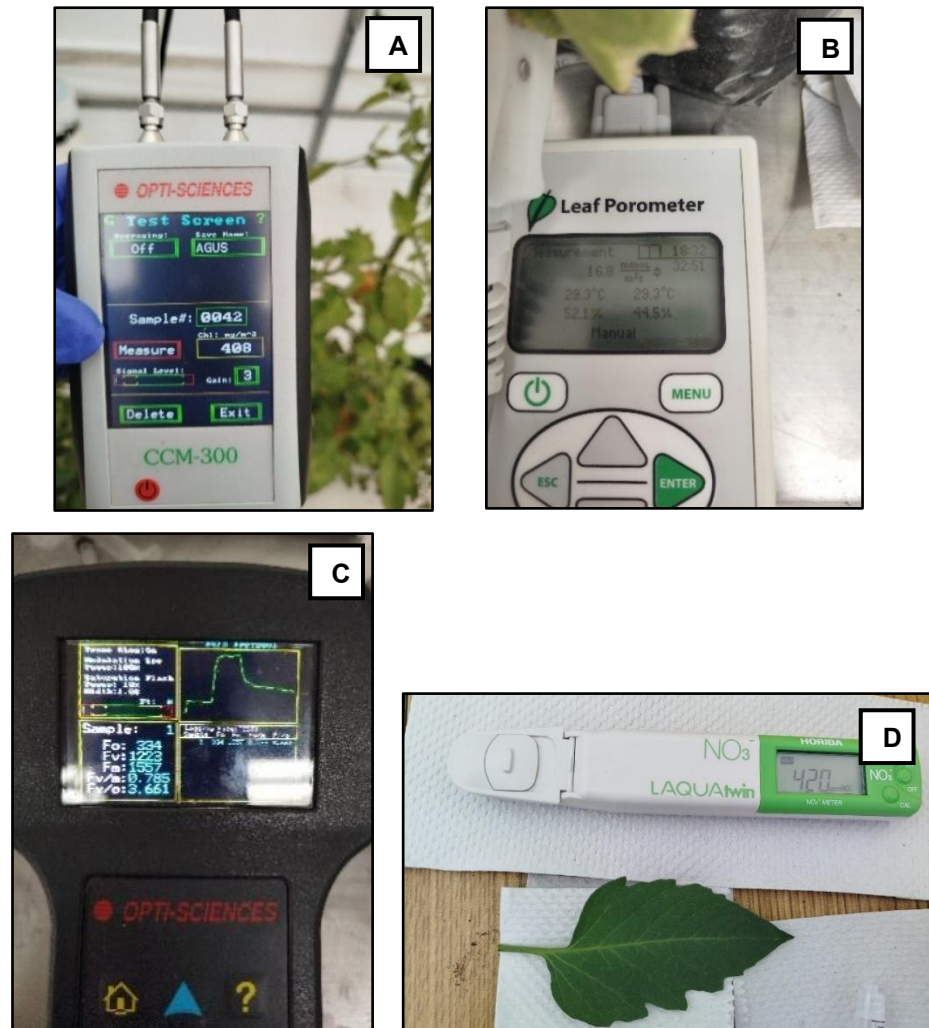


Figura 28. Equipos utilizados en la medición de variables fisiológicas del cultivo de jitomate. (A) contenido de clorofila, (B) conductancia estomática, (C) eficiencia fotosintética y (D) contenido de nitratos

En la Tabla 25 se presentan las variables del suelo registradas en diferentes momentos del ciclo del cultivo.

Tabla 25. Variables, equipo y periodicidad de medición en suelo

	<b>Equipo de medición</b>	<b>Tiempo</b>
<b>Variables de parámetros físicos y químicos en suelo del cultivo</b>		
pH	Medidor de pH (ORION 4 STAR, THERMO SCIENTIFIC)	Una vez por semana durante el ciclo de cultivo
Conductividad eléctrica dS/m	Equipo portátil para medir CE y Humedad del suelo (TDR 150, FIELDSCOUT)	Una vez por semana durante el mes de diciembre
	Equipo para medir CE del suelo (ORION, THERMO SCIENTIFIC)	Cosecha
Materia orgánica %	Metodología según la NOM-021- RECNAT-2000	Cosecha
Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>	Metodología según la NOM-021- RECNAT-2000	Cosecha
Contenido de nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) ppm	Medidor de nitratos (LAQUATWIN, HORIBA)	Cosecha



Figura 29. Equipo utilizado en la medición de conductividad eléctrica en suelo durante el cultivo de jitomate

Se contabilizaron los frutos cosechados desde el primero hasta el tercer racimo de cada planta y se realizaron las mediciones de las variables de rendimiento y calidad correspondientes (Figura 30).

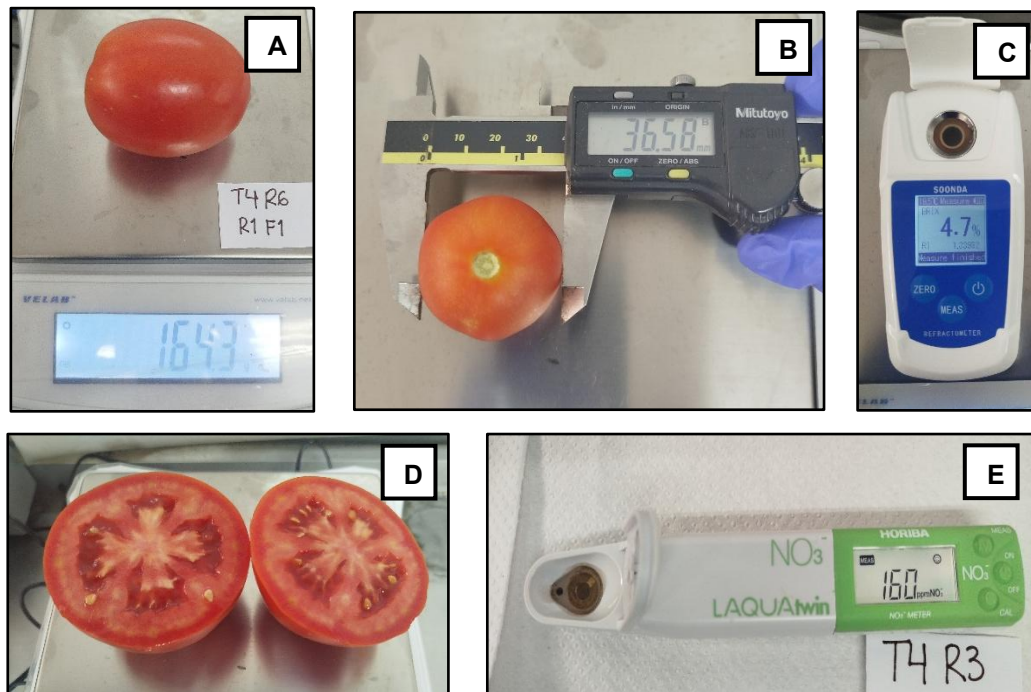


Figura 30. Medición de variables de rendimiento y calidad en el fruto de jitomate después de la cosecha. (A) peso fresco, (B) diámetro ecuatorial, (C) ° Brix, (D) vista interna y (E) contenido de nitratos

Al finalizar el ciclo de cultivo, se realizó el análisis de suelo de pH, conductividad eléctrica, densidad aparente y materia orgánica de acuerdo con la metodología descrita en la NOM-021-RECNAT-2000 (Figura 31).



Figura 31. Determinación de textura, CE y materia orgánica del suelo después de la cosecha

Las condiciones climáticas dentro del invernadero fueron registradas mediante un datalogger HOBO, el cual permitió monitorear temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica.

### Análisis Estadístico

Los datos obtenidos en cada unidad experimental se ordenaron por fecha de muestreo y ciclo de reproducción para analizarlos por las pruebas de Levene para la homogeneidad de varianzas. Enseguida, se procedió a un análisis de varianza y a pruebas de sensibilidad de medias de Tukey y LSD de Fisher ( $P < 0.05$ ) para determinar diferencias entre tratamientos. Cuando no se reportaron diferencias, se realizaron pruebas de contrastes y polinomios ortogonales para ver la tendencia de los tratamientos utilizando el software SAS para Windows versión 9.0.

## 2.3 Resultados y discusión

**Caracterización de suelo y agua:** Los valores obtenidos de las propiedades fisicoquímicas del suelo y agua de riego, antes de iniciar el ciclo de cultivo, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, se consideran adecuados para considerar que el suelo utilizado en el experimento es de buena calidad para uso agrícola.

Un valor de pH en suelo de 7.91 indica un suelo medianamente alcalino. El pH óptimo de los suelos agrícolas debe variar entre 6.0 y 7.0 para asegurar la disponibilidad de nutrientes que absorben las plantas (Ibarra *et al.*, 2009; Osorio, 2012). La conductividad eléctrica corresponde a un suelo muy ligeramente salino con un valor de 1.6 dS/m, apto para su uso agrícola (Salgado *et al.*, 2006). El suelo analizado es rico en materia orgánica, con un 5.63%, permitiendo liberar nutrientes que pueden ser asimilados por las raíces de las plantas en crecimiento. El valor de densidad aparente, 1.02 g/cm<sup>3</sup>, es bajo para suelos francos según la norma anteriormente mencionada. La cantidad de 50.2 mg/kg de nitrógeno es alta por estar estrechamente relacionada con un alto contenido de materia orgánica. Un suelo franco permite un buen drenaje, su estructura admite una buena oxigenación para el desarrollo de las raíces de las plantas, por lo que hay una disponibilidad óptima de nutrientes; lo cual lo hace un suelo ideal para la agricultura (Jiménez, 1989). Además, su alto contenido de materia orgánica es una fuente de nutrientes para las plantas, la cual promueve la actividad biológica y mejora su estructura y textura obteniendo una mayor fertilidad (Molina, 2007).

El agua de riego con un pH de 7.94 es considerada moderadamente alcalina y con una conductividad baja, 0.49 dS/m (Tabla 4), lo que garantiza que no habrá acumulación de sales en un mediano y largo plazo y representa un agua sin restricciones de uso para este cultivo (Vázquez *et al.*, 2022).

En este experimento, los valores de las condiciones climáticas dentro del invernadero registrados por el datalogger HOB0 se presentan en la tabla 26, únicamente en las fechas cuando se realizaron las mediciones de cada una de las variables.

Tabla 26. Condiciones experimentales dentro del invernadero durante el ciclo de cultivo de jitomate.

<b>Días después del trasplante (ddt)</b>	<b>Temperatura puntual (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Temperatura máxima del día (°C)</b>	<b>Intensidad lumínica (lux)</b>
<b>28</b>	18.3	88.8	30.8	689.8
<b>35</b>	17.7	91.1	49.6	2629.2
<b>41</b>	17.2	77.8	31.2	3.9
<b>49</b>	11.2	90.2	46.2	2022.2
<b>56</b>	13.4	83.8	45.5	1872.4
<b>63</b>	10.0	87.8	48.2	1959.1
<b>70</b>	16.8	93.3	47.1	2211.4
<b>77</b>	11.8	91.1	44.1	1935.5
<b>84</b>	11.9	89.6	39.9	413.9
<b>91</b>	12.6	69.6	32.7	3.9
<b>98</b>	6.8	96.9	41.1	642.5
<b>105</b>	13.1	46.2	45.5	3.9

**Contenido de Clorofila:** En los vegetales se encuentran principalmente dos tipos de clorofila: la clorofila a y la clorofila b (Azcón & Talón, 2013). Este pigmento fotosintético, presente en las plantas, es responsable de absorber la luz solar necesaria para el proceso de fotosíntesis (Limantara et al., 2015). El contenido de clorofila en las hojas está estrechamente relacionado con la concentración de nitrógeno en el tejido foliar, lo cual permite monitorear el estado nutricional de las hortalizas y, además, sirve como indicador del inicio de la senescencia foliar (Xu & Mou, 2016).

En este experimento, al realizar la prueba de Tukey, se encontraron diferencias estadísticas en el promedio de todas las mediciones para cada tratamiento y en cada una de las mediciones, excepto en la medición realizada a los 77 ddt (Tabla 27). El tratamiento 1, con la relación 100/0, presentó un mayor contenido de clorofila (410.82 mg/m<sup>2</sup>) en promedio; disminuyendo en todas las relaciones de fertilización hasta llegar

al valor mínimo del tratamiento 7 con una fertilización totalmente orgánica (295.39 mg/m<sup>2</sup>).

En contraste, la prueba LSD, sí reveló diferencias significativas a los 77 ddt mostrando los valores más bajos de todas las mediciones (Tabla 28). Se detectó un mayor número de diferencias en las etapas tempranas del cultivo, el tratamiento 7 (0/100), que representa el uso exclusivo de fertilizante orgánico, se ubicó consistentemente en los grupos estadísticamente inferiores en ambas pruebas, particularmente en la etapa final del ciclo de cultivo (98 y 105 ddt), lo cual podría estar relacionado con la lenta mineralización de nutrientes y la baja disponibilidad de nitrógeno inorgánico para la planta.

Este patrón sugiere que, aunque los abonos orgánicos aportan beneficios a largo plazo, su uso exclusivo podría no ser suficiente para satisfacer la demanda fisiológica de la planta en etapas críticas de desarrollo, como la floración y la formación de frutos. Lo anterior, es más evidente en cultivos de ciclos largos, demanda importante de nutrientes y alta productividad, como el jitomate de crecimiento indeterminado.

Tabla 27. Contenido de clorofila (mg/m<sup>2</sup>) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	77	91	98	105	PROMEDIO
días después del trasplante					
<b>100/0</b>	164.29 <sup>A</sup>	471.43 <sup>AB</sup>	502.43 <sup>A</sup>	505.14 <sup>A</sup>	410.82 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	167.43 <sup>A</sup>	397.29 <sup>AB</sup>	432.57 <sup>AB</sup>	446.14 <sup>AB</sup>	360.86 <sup>AB</sup>
<b>90/10</b>	147.14 <sup>A</sup>	477.86 <sup>A</sup>	497.00 <sup>A</sup>	468.86 <sup>A</sup>	397.71 <sup>AB</sup>
<b>85/15</b>	188.14 <sup>A</sup>	428.29 <sup>AB</sup>	469.71 <sup>A</sup>	430.71 <sup>AB</sup>	379.21 <sup>AB</sup>
<b>80/20</b>	155.14 <sup>A</sup>	416.29 <sup>AB</sup>	455.29 <sup>A</sup>	446.00 <sup>AB</sup>	368.18 <sup>AB</sup>
<b>75/25</b>	162.29 <sup>A</sup>	419.14 <sup>AB</sup>	439.00 <sup>A</sup>	449.86 <sup>AB</sup>	367.57 <sup>AB</sup>
<b>0/100</b>	198.00 <sup>A</sup>	353.86 <sup>B</sup>	319.43 <sup>B</sup>	310.29 <sup>B</sup>	295.39 <sup>B</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey, p≤0.05), n=7

Tabla 28. Contenido de clorofila (mg/m<sup>2</sup>) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	77	91	98	105	PROMEDIO
días después del trasplante					
<b>100/0</b>	164.29 <sup>ABC</sup>	471.43 <sup>A</sup>	502.43 <sup>A</sup>	505.14 <sup>A</sup>	410.82 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	167.43 <sup>ABC</sup>	397.29 <sup>AB</sup>	432.57 <sup>A</sup>	446.14 <sup>A</sup>	360.86 <sup>AB</sup>
<b>90/10</b>	147.14 <sup>C</sup>	477.86 <sup>A</sup>	497.00 <sup>A</sup>	468.86 <sup>A</sup>	397.71 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	188.14 <sup>AB</sup>	428.29 <sup>AB</sup>	469.71 <sup>A</sup>	430.71 <sup>A</sup>	379.21 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	155.14 <sup>BC</sup>	416.29 <sup>AB</sup>	455.29 <sup>A</sup>	446.00 <sup>A</sup>	368.18 <sup>AB</sup>
<b>75/25</b>	162.29 <sup>ABC</sup>	419.14 <sup>AB</sup>	439.00 <sup>A</sup>	449.86 <sup>A</sup>	367.57 <sup>AB</sup>
<b>0/100</b>	198.00 <sup>A</sup>	353.86 <sup>B</sup>	319.43 <sup>B</sup>	310.29 <sup>B</sup>	295.39 <sup>B</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

De manera general, los valores en el contenido de clorofila para todas las relaciones de los tratamientos se encontraron en el rango de 147 a 505 mg/m<sup>2</sup> (Figura 32), el cual coincide con Nemeskéri y Helyes (2019), quienes reportaron un contenido de clorofila de 295 mg/m<sup>2</sup> en plantas sanas de jitomate. En la gráfica de la figura 32, se observa una tendencia creciente del contenido de clorofila desde los 77 hasta los 91 ddt, momento en el cual la mayoría de los tratamientos alcanzan su máximo valor. Este comportamiento corresponde a la etapa de desarrollo vegetativo y transición hacia la fase reproductiva del cultivo, periodo en el que la actividad fotosintética es elevada. Los tratamientos con mayor proporción de fertilización mineral (100/0, 90/10 y 85/15) presentaron los valores más altos de clorofila durante todo el ciclo, específicamente entre los 91 y 98 ddt; estos resultados indican que el nitrógeno presente en el fertilizante mineral favorece la síntesis de clorofila, lo que se traduce en una mayor eficiencia fotosintética.

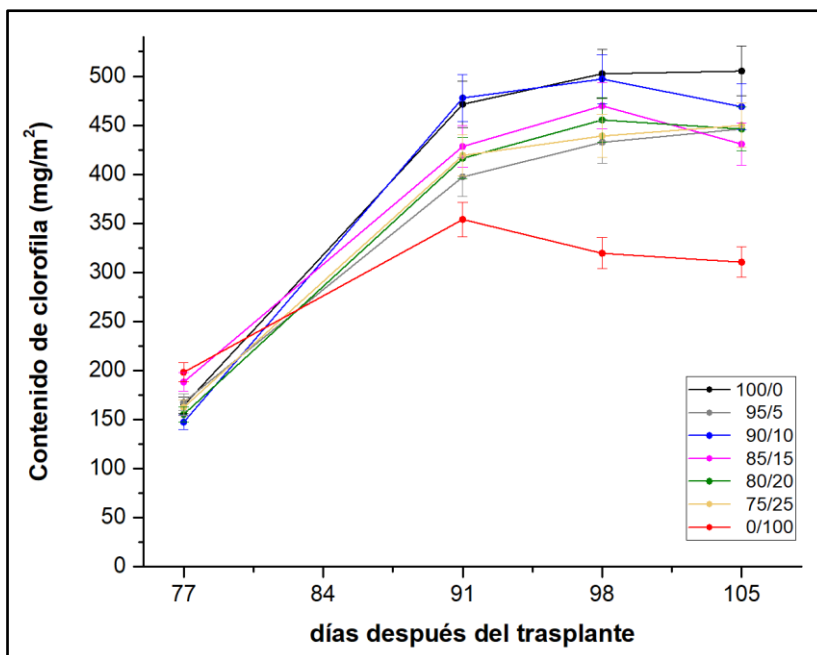


Figura 32. Contenido de clorofila en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

En contraste, las plantas con el tratamiento 7 (0/100) iniciaron con valores comparables a los demás tratamientos y, a partir de los 91 ddt presentaron una disminución progresiva en el contenido de clorofila, alcanzando los valores más bajos al final del ciclo. Lo anterior puede relacionarse con una mayor demanda de nutrientes que no fue satisfecha por la fuente y se movilizaron de las hojas hacia los órganos reproductivos; y a una senescencia más precoz de las hojas por efecto del tratamiento. Los tratamientos con fertilización combinada lograron mantener niveles de clorofila similares a los tratamientos 100% minerales, lo que sugiere que es posible reducir parcialmente la dosis de fertilizante mineral sin afectar significativamente el contenido de clorofila foliar.

**Conductancia estomática ( $g_s$ ):** El sistema estomático de las plantas es el principal regulador del ingreso de dióxido de carbono a las hojas y de la pérdida de agua por transpiración. Su apertura está influenciada por diversos factores, incluyendo

la cantidad, forma, disposición, tamaño y capacidad de movimiento de los estomas, así como por condiciones ambientales externas como el incremento de la radiación fotosintéticamente activa, temperaturas favorables para la fotosíntesis y una mayor humedad relativa del aire (Larcher, 2003). En esta misma línea, Pino *et al.* (2019) indican que existe evidencia que vincula un aumento en la temperatura foliar con una mayor conductancia estomática.

De acuerdo con las pruebas estadísticas realizadas, no se detectaron efectos significativos en los promedios de los tratamientos en conductancia estomática, sólo en las mediciones puntuales (Tablas 29 y 30). El tratamiento 7 (100% orgánico), en promedio, favorece a valores más altos de conductancia estomática en plantas de jitomate, comportamiento que puede estar asociado a una mejor condición hídrica en el suelo con mayor proporción de materia orgánica, la cual mantiene una mayor disponibilidad de agua contribuyendo a una mayor apertura estomática (Taiz, 2013). Sin embargo, otros tratamientos con proporciones mixtas, como el de la relación 80/20, presentó el valor más alto de conductancia estomática. En la tabla 29, conforme avanza el tiempo del ciclo del cultivo, aparecen y desaparecen diferencias significativas, lo cual también se relaciona con la variación de la respuesta fisiológica de las plantas según la etapa de desarrollo en la que se encuentran y las condiciones ambientales. Tras el trasplante, el desarrollo vegetativo temprano del cultivo ocurrió entre los 0 y 45 días, caracterizado por la emisión de hojas verdaderas, el crecimiento de la planta y la adaptación radicular. Posteriormente, entre los 45 y 60 ddt, inició la diferenciación de inflorescencias donde, según Welty *et al.* (2017), se determina el potencial de producción del cultivo. La fase de floración activa se presentó entre los 61 y 70 ddt dando paso al cuajado y crecimiento del fruto entre los 71 y 78 ddt. A partir de los 79 ddt, los frutos iniciaron la maduración fisiológica, evidenciada por el cambio gradual de color, hasta alcanzar la madurez entre los 91 y 105 ddt, de acuerdo con la variedad utilizada y las condiciones ambientales.

Tabla 29. Conductancia estomática ( $g_s$ ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	28	35	42	49	56	63	70	77	91	105	PROMEDIO
días después del trasplante											
<b>100/0</b>	140.6 <sup>A</sup>	138.8 <sup>A</sup>	130.1 <sup>A</sup>	128.0 <sup>AB</sup>	138.7 <sup>A</sup>	149.7 <sup>B</sup>	180.9 <sup>A</sup>	134.3 <sup>A</sup>	142.6 <sup>A</sup>	139.7 <sup>A</sup>	143.6 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	133.0 <sup>A</sup>	141.1 <sup>A</sup>	134.7 <sup>A</sup>	126.9 <sup>AB</sup>	142.5 <sup>A</sup>	171.3 <sup>AB</sup>	160.4 <sup>A</sup>	149.3 <sup>A</sup>	130.4 <sup>A</sup>	132.9 <sup>A</sup>	143.5 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	137.2 <sup>A</sup>	142.0 <sup>A</sup>	133.3 <sup>A</sup>	119.8 <sup>B</sup>	149.0 <sup>A</sup>	170.2 <sup>AB</sup>	161.9 <sup>A</sup>	150.2 <sup>A</sup>	134.9 <sup>A</sup>	130.8 <sup>A</sup>	144.2 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	138.6 <sup>A</sup>	133.9 <sup>A</sup>	133.0 <sup>A</sup>	126.5 <sup>AB</sup>	141.0 <sup>A</sup>	167.9 <sup>AB</sup>	167.0 <sup>A</sup>	138.4 <sup>A</sup>	140.4 <sup>A</sup>	149.0 <sup>A</sup>	145.4 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	152.1 <sup>A</sup>	137.0 <sup>A</sup>	136.6 <sup>A</sup>	128.7 <sup>AB</sup>	153.7 <sup>A</sup>	164.1 <sup>AB</sup>	170.1 <sup>A</sup>	152.0 <sup>A</sup>	160.8 <sup>A</sup>	135.6 <sup>A</sup>	150.5 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	136.2 <sup>A</sup>	134.0 <sup>A</sup>	139.4 <sup>A</sup>	130.1 <sup>AB</sup>	126.2 <sup>A</sup>	177.4 <sup>A</sup>	173.0 <sup>A</sup>	152.9 <sup>A</sup>	151.7 <sup>A</sup>	132.6 <sup>A</sup>	148.3 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	136.5 <sup>A</sup>	146.0 <sup>A</sup>	138.3 <sup>A</sup>	134.0 <sup>A</sup>	126.1 <sup>A</sup>	176.4 <sup>A</sup>	163.8 <sup>A</sup>	154.1 <sup>A</sup>	146.4 <sup>A</sup>	146.1 <sup>A</sup>	148.4 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 30. Conductancia estomática ( $g_s$ ) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	28	35	42	49	56	63	70	77	91	105	PROMEDIO
días después del trasplante											
<b>100/0</b>	140.6 <sup>A</sup>	138.8 <sup>A</sup>	130.1 <sup>A</sup>	128.0 <sup>A</sup>	138.7 <sup>AB</sup>	149.7 <sup>B</sup>	180.9 <sup>A</sup>	134.3 <sup>B</sup>	142.6 <sup>A</sup>	139.7 <sup>A</sup>	143.6 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	133.0 <sup>A</sup>	141.1 <sup>A</sup>	134.3 <sup>A</sup>	126.9 <sup>AB</sup>	142.5 <sup>AB</sup>	171.3 <sup>A</sup>	160.4 <sup>A</sup>	149.3 <sup>AB</sup>	130.4 <sup>A</sup>	132.9 <sup>A</sup>	143.5 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	137.2 <sup>A</sup>	142.0 <sup>A</sup>	133.0 <sup>A</sup>	119.8 <sup>B</sup>	149.0 <sup>A</sup>	170.2 <sup>A</sup>	161.9 <sup>A</sup>	150.2 <sup>AB</sup>	134.9 <sup>A</sup>	130.8 <sup>A</sup>	144.2 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	138.6 <sup>A</sup>	133.9 <sup>A</sup>	133.5 <sup>A</sup>	126.5 <sup>AB</sup>	141.0 <sup>AB</sup>	167.9 <sup>A</sup>	167.0 <sup>A</sup>	138.4 <sup>AB</sup>	140.4 <sup>A</sup>	149.0 <sup>A</sup>	145.4 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	152.1 <sup>A</sup>	137.0 <sup>A</sup>	136.5 <sup>A</sup>	128.7 <sup>A</sup>	153.7 <sup>A</sup>	164.1 <sup>AB</sup>	170.1 <sup>A</sup>	152.0 <sup>AB</sup>	160.8 <sup>A</sup>	135.6 <sup>A</sup>	150.5 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	136.2 <sup>A</sup>	134.0 <sup>A</sup>	139.6 <sup>A</sup>	130.1 <sup>A</sup>	126.2 <sup>B</sup>	177.4 <sup>A</sup>	173.0 <sup>A</sup>	152.9 <sup>AB</sup>	151.7 <sup>A</sup>	132.6 <sup>A</sup>	148.3 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	136.5 <sup>A</sup>	146.0 <sup>A</sup>	138.4 <sup>A</sup>	134.0 <sup>A</sup>	126.1 <sup>B</sup>	176.4 <sup>A</sup>	163.8 <sup>A</sup>	154.1 <sup>A</sup>	146.4 <sup>A</sup>	146.1 <sup>A</sup>	148.4 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

La figura 33 muestra que todos los tratamientos, entre los 28 y 49 ddt, presentaron una conductancia estomática relativamente estable, con valores entre 126 y 180  $mmol/m^2 \cdot s$ . Esta fase coincide con el desarrollo vegetativo, donde la demanda de  $CO_2$  y agua es moderada. Al respecto, Larcher (2003) menciona que los cultivos tienen valores de conductancia estomática entre 400 y 500  $mmol/m^2 \cdot s$ , mientras que otros autores han reportado valores entre 125 y 1200  $mmol/m^2 \cdot s$  en condiciones ambientales óptimas para el cultivo de jitomate (Acatrinei, 2010; Nemeskéri & Helyes, 2019). Los valores bajos de  $g_s$ , entre 28 y 49 ddt, posiblemente se dieron por un déficit de humedad del sustrato. De los 63 a los 77 ddt se observa un pico pronunciado en

todos los tratamientos, coincidiendo con el inicio de la fase reproductiva y puede estar asociado a un incremento en la actividad fotosintética y de transpiración durante la diferenciación floral e inicio de floración, lo cual incrementa la apertura estomática para favorecer el ingreso de  $\text{CO}_2$  (Welty *et al.*, 2017). Después de este pico, hay una reducción de la conductancia, probablemente relacionada con el aumento de la temperatura o estrés hídrico transitorio durante la floración plena. Es posible que en esta etapa haya comenzado la formación de frutos, lo cual implica un ajuste fisiológico en el balance hídrico y la eficiencia del uso del agua, cerrando parcialmente los estomas para reducir la pérdida de agua (Medrano *et al.*, 2015).

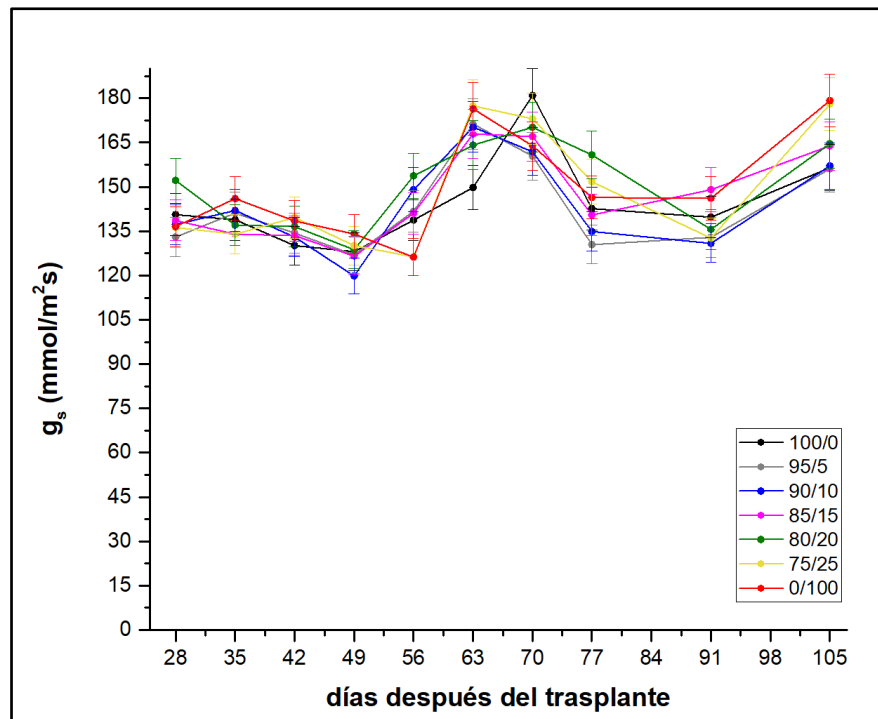


Figura 33. Conductancia estomática en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

**Eficiencia Fotosintética (Fv/Fm):** El rendimiento fotosintético óptimo está estrechamente vinculado con la fuente de nitrógeno que recibe la planta, ya que tanto la disponibilidad de este nutriente como la radiación influyen directamente en el proceso fotosintético (Taiz, 2013).

La tabla 31, con los datos obtenidos después de la prueba de Tukey, muestra que no se presentaron diferencias significativas en el promedio de todos los tratamientos, aunque el tratamiento 1 (100/0) tuvo una eficiencia fotosintética significativamente menor a los 77 y 91 ddt; sugiriendo que la fertilización totalmente mineral pudo haber sido menos eficiente en ese momento del ciclo. Sin embargo, la tabla 32 muestra los datos obtenidos después de la prueba de Fisher, mismos que detectan una mayor discriminación entre tratamientos. Al igual que con Tukey, no se encontraron diferencias significativas en los promedios de todos los tratamientos, pero sí a los 28, 56, 70, 77, 91 y 105 ddt; sugiriendo que los tratamientos con mayor proporción de fertilización orgánica tuvieron un comportamiento menos estable y que las ligeras caídas en los 28 y 77 ddt estuvieron relacionadas con un estrés por temperatura ambiental después del trasplante y en etapas reproductivas.

Tabla 31. Eficiencia fotosintética (Fv/Fm) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	28	35	42	49	56	63	70	77	91	105	PROMEDIO
días después del trasplante											
100/0	0.51 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.58 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.63 <sup>AB</sup>	0.48 <sup>B</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.75 <sup>A</sup>	0.58 <sup>A</sup>
95/5	0.49 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.63 <sup>AB</sup>	0.51 <sup>AB</sup>	0.51 <sup>A</sup>	0.76 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>
90/10	0.49 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>	0.66 <sup>A</sup>	0.53 <sup>AB</sup>	0.58 <sup>A</sup>	0.75 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>
85/15	0.48 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.59 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.60 <sup>AB</sup>	0.50 <sup>AB</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.75 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>
80/20	0.49 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.53 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.62 <sup>AB</sup>	0.49 <sup>AB</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.76 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>
75/25	0.48 <sup>A</sup>	0.53 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.53 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>	0.58 <sup>B</sup>	0.53 <sup>AB</sup>	0.53 <sup>A</sup>	0.75 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>
0/100	0.46 <sup>A</sup>	0.52 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.52 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.60 <sup>AB</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.52 <sup>A</sup>	0.74 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 32. Eficiencia fotosintética (Fv/Fm) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	28	35	42	49	56	63	70	77	91	105	PROMEDIO
	días después del trasplante										
100/0	0.51 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.58 <sup>AB</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.63 <sup>AB</sup>	0.48 <sup>B</sup>	0.56 <sup>AB</sup>	0.75 <sup>AB</sup>	0.58 <sup>A</sup>
95/5	0.49 <sup>AB</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.56 <sup>AB</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.63 <sup>AB</sup>	0.51 <sup>B</sup>	0.51 <sup>B</sup>	0.76 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>
90/10	0.49 <sup>AB</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.55 <sup>B</sup>	0.57 <sup>A</sup>	0.66 <sup>A</sup>	0.53 <sup>AB</sup>	0.58 <sup>A</sup>	0.75 <sup>AB</sup>	0.57 <sup>A</sup>
85/15	0.48 <sup>AB</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.54 <sup>A</sup>	0.59 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.60 <sup>BC</sup>	0.50 <sup>B</sup>	0.55 <sup>AB</sup>	0.75 <sup>AB</sup>	0.57 <sup>A</sup>
80/20	0.49 <sup>AB</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.53 <sup>A</sup>	0.56 <sup>AB</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.62 <sup>ABC</sup>	0.49 <sup>B</sup>	0.56 <sup>AB</sup>	0.76 <sup>A</sup>	0.56 <sup>A</sup>
75/25	0.48 <sup>AB</sup>	0.53 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.53 <sup>A</sup>	0.55 <sup>B</sup>	0.57 <sup>A</sup>	0.58 <sup>C</sup>	0.53 <sup>AB</sup>	0.53 <sup>AB</sup>	0.75 <sup>AB</sup>	0.56 <sup>A</sup>
0/100	0.46 <sup>B</sup>	0.52 <sup>A</sup>	0.55 <sup>A</sup>	0.52 <sup>A</sup>	0.55 <sup>B</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.60 <sup>C</sup>	0.56 <sup>A</sup>	0.52 <sup>AB</sup>	0.74 <sup>B</sup>	0.56 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

El rango reportado por varios autores de Fv/Fm en plantas de jitomate sanas y no estresadas es de 0.77 a 0.83 (Lara *et al.*, 2020; Nemeskéri & Helyes, 2019). El rango promedio de valores registrados en las plantas de jitomate de la figura 34 se encuentra entre 0.45 y 0.75, lo cual indica que se encontraron sanas durante todo el ciclo de cultivo.

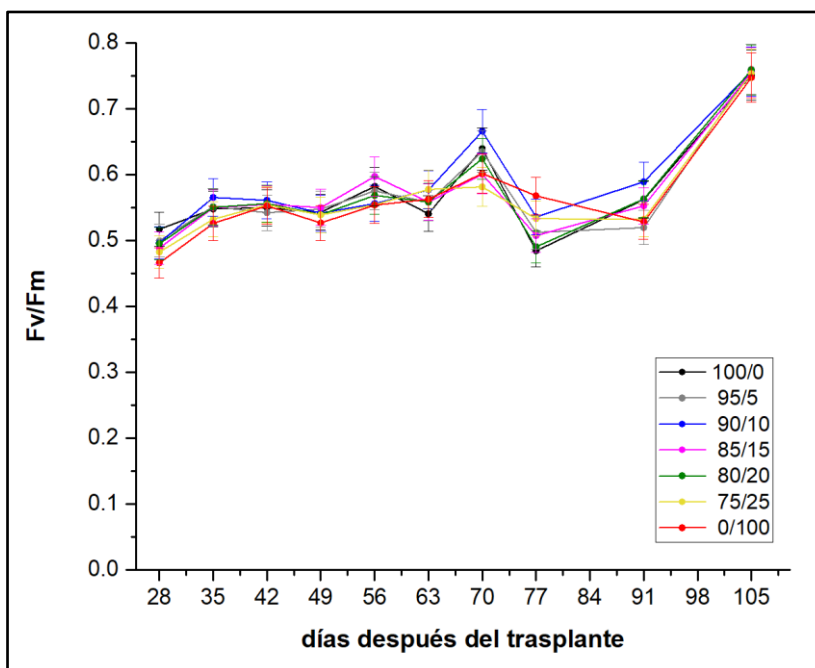


Figura 34. Eficiencia fotosintética en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

También se muestra que entre los 28 y 49 ddt todos los tratamientos comienzan su fase vegetativa con valores relativamente bajos por el estrés después del trasplante y su adaptación al suelo; para los 35 ddt, los valores aumentan progresivamente indicando una recuperación de la actividad fotosintética. Desde los 56 hasta los 70 ddt hubo una ligera disminución y posterior aumento por la etapa en la que se encontraba el cultivo en el tiempo de cada medición. En los 77 ddt ocurrió una caída en los valores de Fv/Fm en todos los tratamientos, al ser una disminución uniforme, posiblemente pueda estar atribuida al inicio de la senescencia en las hojas de muestreo; provocando una reducción en la eficiencia fotosintética. Finalmente, a los 105 ddt todos los tratamientos mostraron una recuperación alcanzando valores entre 0.74 y 0.76, probablemente por haber realizado la medición en hojas más jóvenes.

**Contenido de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en tejido foliar:** Según los datos mostrados en las tablas 33 y 34, sólo se encontraron efectos significativos al inicio del cultivo y en el promedio de todos los tratamientos por el contenido de nitratos. En todo momento, el tratamiento 3 (90/10) presentó una mayor concentración, indicando que con esta proporción se podría estar promoviendo una alta absorción de nitrógeno, lo que impactará en el rendimiento.

Tabla 33. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	Inicio	Mitad	Final	PROMEDIO
<b>100/0</b>	2214 <sup>A</sup>	1921 <sup>A</sup>	2457 <sup>A</sup>	2013 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	2771 <sup>A</sup>	1688 <sup>A</sup>	2615 <sup>A</sup>	2215 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	2814 <sup>A</sup>	2387 <sup>A</sup>	3214 <sup>A</sup>	2633 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	2657 <sup>A</sup>	2108 <sup>A</sup>	3085 <sup>A</sup>	2477 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	2542 <sup>A</sup>	1614 <sup>A</sup>	2314 <sup>A</sup>	1967 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	2400 <sup>A</sup>	2042 <sup>A</sup>	3085 <sup>A</sup>	2418 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	2186 <sup>A</sup>	1503 <sup>A</sup>	2486 <sup>A</sup>	1961 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey, p≤0.05), n=7

Tabla 34. Contenido de nitratos (ppm) en tejido foliar del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Inicio</b>	<b>Mitad</b>	<b>Final</b>	<b>PROMEDIO</b>
<b>100/0</b>	2214 <sup>B</sup>	1921 <sup>A</sup>	2457 <sup>A</sup>	2013 <sup>BC</sup>
<b>95/5</b>	2771 <sup>AB</sup>	1688 <sup>A</sup>	2615 <sup>A</sup>	2215 <sup>ABC</sup>
<b>90/10</b>	2814 <sup>A</sup>	2387 <sup>A</sup>	3214 <sup>A</sup>	2633 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	2657 <sup>AB</sup>	2108 <sup>A</sup>	3085 <sup>A</sup>	2477 <sup>AB</sup>
<b>80/20</b>	2542 <sup>AB</sup>	1614 <sup>A</sup>	2314 <sup>A</sup>	1967 <sup>C</sup>
<b>75/25</b>	2400 <sup>AB</sup>	2042 <sup>A</sup>	3085 <sup>A</sup>	2418 <sup>ABC</sup>
<b>0/100</b>	2186 <sup>B</sup>	1503 <sup>A</sup>	2486 <sup>A</sup>	1961 <sup>C</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

El rango del contenido de nitratos que se registró, en los tres momentos del cultivo (Figura 35), se encontró entre 1614 y 3214 ppm. En todos los tratamientos, la concentración de  $\text{NO}_3^-$  tiende a incrementarse hacia el final del ciclo, lo cual sugiere una acumulación progresiva de nitratos en el tejido conforme avanza el desarrollo del cultivo. Esto podría atribuirse a que la planta se prepara con más nutrientes que puede movilizar a los órganos reproductivos y frutos en formación.

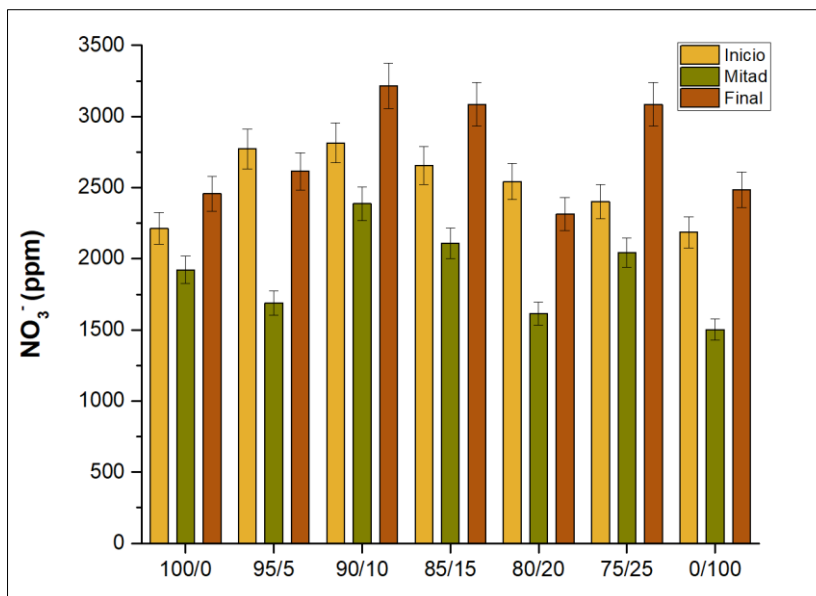


Figura 35. Contenido de nitratos en tejido foliar de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

Los tratamientos 3 (90/10), 4 (85/15) y 6 (75/25) alcanzan las concentraciones más altas de nitratos al final del cultivo, lo cual podría estar relacionado con una mayor disponibilidad de nitrógeno debido a una combinación equilibrada de fertilización mineral y orgánica, y posiblemente también a una menor eficiencia en la utilización del nitrógeno por la planta. El tratamiento 7 (100% orgánico) muestra una tendencia general a tener valores más bajos de nitrato, lo cual es coherente con la liberación lenta de nitrógeno, característica de los fertilizantes orgánicos. Este comportamiento es similar a lo reportado por Preciado *et al.* (2011), quienes obtuvieron los valores más bajos de nitratos en los tratamientos orgánicos (entre 218.2 y 454.64 ppm)

Actualmente, no existe una normativa específica que establezca un valor máximo permisible de concentración de nitratos en tejidos vegetales de jitomate. Esta ausencia de regulación dificulta la comparación de los resultados con criterios oficiales, por lo que la interpretación se sustenta en valores de referencia reportados en la literatura para hortalizas cultivadas en invernaderos, como la lechuga y las espinacas,

en los cuales la Comisión Europea (EC, 2011) ha establecido límites de 2,500 a 5,000 ppm.

**Número de frutos:** No se detectaron diferencias estadísticas significativas en el promedio de todos los tratamientos con la prueba de Tukey y la prueba de mínima significancia de Fisher (Tablas 35 y 36); aunque se observa una tendencia numérica decreciente conforme se incrementa la proporción de fertilización orgánica. La fertilización completamente mineral presentó un 37.4 % más de frutos que la fertilización completamente orgánica. Estos datos difieren con Dimas *et al.* (2008), quien reportó una obtención de mayor número de frutos al utilizar apenas 15% de humus de lombriz en plantas de jitomate; pero son consistentes con los reportados por Preciado *et al.* (2011), quienes observaron una reducción de 42 % en la cantidad de frutos en comparación con fertilización totalmente mineral.

**Peso Fresco:** De acuerdo con las tablas 35 y 36, no se detectaron diferencias significativas en el peso fresco. Se registró variabilidad numérica no proporcional a los tratamientos y fue interesante observar que con la proporción 95/5 se obtuvieron los frutos más pesados. También con la relación 0/100 se lograron jitomates con mayor peso respecto al tratamiento 100/0. Con base en lo anterior, se confirma que la fertilización orgánica promueve la producción de frutos más pesados; lo que concuerda con los resultados obtenidos por Dimas *et al.* (2008); quienes registraron frutos hasta 50 % más pesados que los cosechados en este trabajo. Lo anterior no es del todo comparable, ya que el tamaño y peso del fruto depende de la mejora genética de la variedad cultivada, entre otros factores. El mayor rendimiento se generó con la fertilización totalmente mineral con 1.52 kg/planta y el menor con la fertilización totalmente orgánica, 1.04 kg/planta. Estos valores son similares con los reportados por Cun *et al.* (2008) donde el menor rendimiento de jitomate se obtuvo con la aplicación completamente orgánica (1.11 kg/planta).

Tabla 35. Variables de rendimiento del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	Número de frutos	Peso fresco (g)	Rendimiento (g/planta)
100/0	19.42 <sup>A</sup>	70.94 <sup>A</sup>	1525.83 <sup>A</sup>
95/5	17.28 <sup>A</sup>	81.70 <sup>A</sup>	1390.85 <sup>A</sup>
90/10	17.42 <sup>A</sup>	63.22 <sup>A</sup>	1115.37 <sup>A</sup>
85/15	15.71 <sup>A</sup>	70.25 <sup>A</sup>	1141.60 <sup>A</sup>
80/20	18.85 <sup>A</sup>	75.07 <sup>A</sup>	1401.57 <sup>A</sup>
75/25	14.83 <sup>A</sup>	66.78 <sup>A</sup>	956.53 <sup>A</sup>
0/100	14.14 <sup>A</sup>	74.74 <sup>A</sup>	1043.64 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 36. Variables de rendimiento del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	Número de frutos	Peso fresco (g)	Rendimiento (g/planta)
100/0	19.42 <sup>A</sup>	70.94 <sup>A</sup>	1525.83 <sup>A</sup>
95/5	17.28 <sup>AB</sup>	81.70 <sup>A</sup>	1390.85 <sup>A</sup>
90/10	17.42 <sup>AB</sup>	63.22 <sup>A</sup>	1115.37 <sup>A</sup>
85/15	15.71 <sup>AB</sup>	70.25 <sup>A</sup>	1141.60 <sup>A</sup>
80/20	18.85 <sup>AB</sup>	75.07 <sup>A</sup>	1401.57 <sup>A</sup>
75/25	14.83 <sup>AB</sup>	66.78 <sup>A</sup>	956.53 <sup>A</sup>
0/100	14.14 <sup>B</sup>	74.74 <sup>A</sup>	1043.64 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

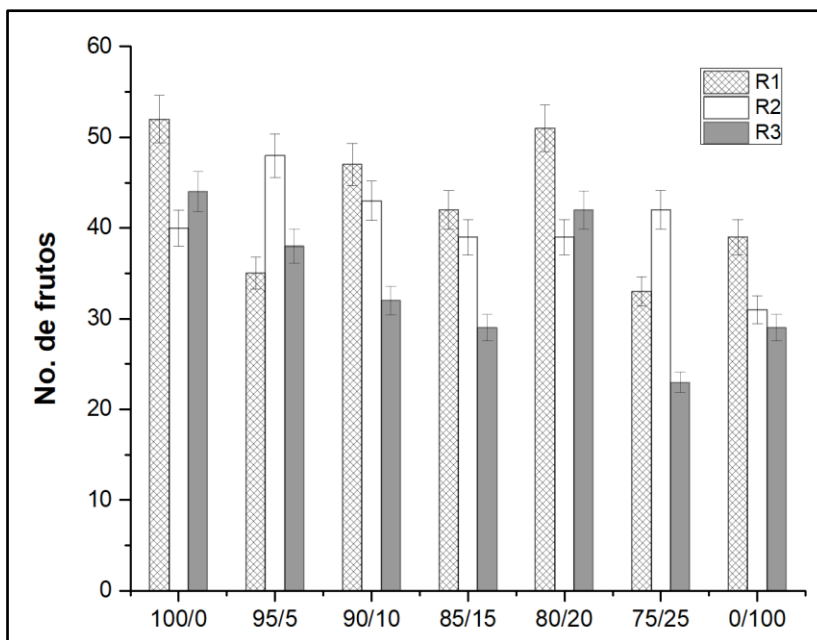


Figura 36. Número de frutos por racimo del cultivo de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

En la Figura 36 se puede observar cómo, en general, que las combinaciones con mayor proporción de fertilización mineral favorecen un mayor número de frutos en el primer racimo. Esto puede deberse a una disponibilidad inmediata de nutrientes esenciales (nitrógeno y potasio) que favorecen la floración y el cuajado temprano de frutos (Callata, 2019). La disminución en el número de frutos del primer al tercer racimo en todos los tratamientos podría deberse a factores fisiológicos propios del cultivo de jitomate, como el agotamiento de reservas, la competencia entre racimos y el avance de la etapa reproductiva donde la planta prioriza el cuajado y llenado de frutos. También se puede atribuir a condiciones de temperatura y humedad relativa.

**Diámetro ecuatorial:** En ambas pruebas estadísticas no se detectaron diferencias significativas en el diámetro ecuatorial (Tablas 37 y 38); lo que indica que la fuente de fertilización no influyó de forma marcada en el tamaño promedio del fruto. Los valores oscilaron entre 42.16 mm (tratamiento 3) y 46.51 mm (tratamiento 2),

mostrando variaciones mínimas que no fueron estadísticamente relevantes. Valores reportados por otros autores se encontraron en un rango de 50 a 80 mm con rendimientos mayores utilizando humus de lombriz en sustitución y combinación con fertilizantes minerales (Dimas *et al.*, 2018; Callata, 2019; Cun & Montero, 2008).

**Grados Brix:** El indicador del contenido de azúcares solubles no presentó efectos significativos con ninguna de las dos pruebas (Tablas 37 y 38). Los valores fluctuaron de 5.19% (tratamiento 5) a 5.79% (tratamiento 4); por lo que la proporción de fertilización mineral y orgánica no afectó el dulzor del fruto. Para la fertilización totalmente orgánica se obtuvo un valor de 5.21 %, más alto que lo reportado por Preciado *et al.* (2011), en donde la fuente orgánica de fertilización presentó el mayor contenido de sólidos solubles. La acumulación de sólidos solubles en el fruto de jitomate se debe a una menor absorción de agua por los frutos y a una alta concentración de sales como sodio (Na) y cloro (Cl) (Rangel, 2011). El mismo autor menciona que el jitomate para consumo fresco debe contener por lo menos 4° Brix; por lo que en esta investigación se obtuvieron frutos aptos para su consumo en fresco.

**Contenido de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en fruto:** En esta variable no se detectaron diferencias significativas con la prueba de Tukey, mientras que con la prueba de Fisher sí las hubo (Tabla 37). La mayor concentración de nitratos se observó en el tratamiento 100% mineral y la menor en el tratamiento 6 (75/25). Con base en la literatura, la Comisión Europea estableció un límite máximo de 50 ppm de nitratos en frutos frescos de jitomate; mientras que, el Ministerio de Salud Pública en Rusia ha establecido un límite máximo de 60 ppm; con el objetivo de proteger la salud del consumidor y asegurar la inocuidad alimentaria. En el presente estudio, los valores de nitratos en fruto de jitomate oscilaron entre 273.46 y 423.73 ppm (Figura 37), encontrándose muy por encima de la concentración máxima permitida según la normativa rusa. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones de manejo y fertilización utilizadas, existe un riesgo potencial de superar los límites internacionales de seguridad para este compuesto.

Nuestros resultados son similares a los obtenidos por Abbaszadeh et al., (2023), quienes reportaron concentraciones entre 409 y 487 ppm de nitratos en frutos frescos de jitomate cultivados en una provincia Iraní. Estos resultados se atribuyeron a la aplicación de elevadas cantidades de fertilización nitrogenada, condiciones del suelo, variables climáticas, variedad y madurez del cultivo.

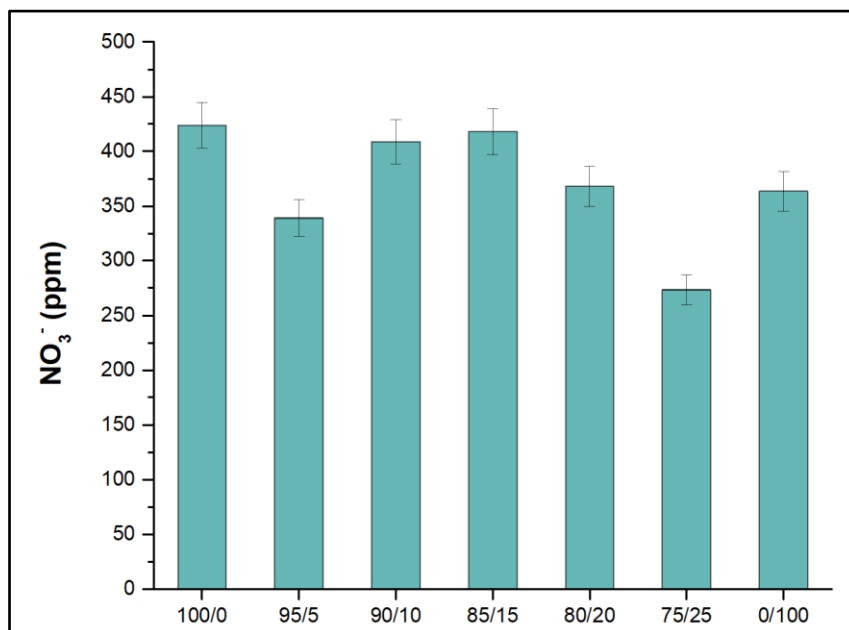


Figura 37. Contenido de nitratos en fruto del cultivo de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

Tabla 37. Variables de calidad del fruto de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	Diámetro ecuatorial (mm)	Grados Brix %	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
100/0	43.68 <sup>A</sup>	5.30 <sup>A</sup>	423.73 <sup>A</sup>
95/5	46.51 <sup>A</sup>	5.28 <sup>A</sup>	339.11 <sup>A</sup>
90/10	42.16 <sup>A</sup>	5.51 <sup>A</sup>	408.69 <sup>A</sup>
85/15	44.50 <sup>A</sup>	5.79 <sup>A</sup>	418.28 <sup>A</sup>
80/20	45.23 <sup>A</sup>	5.19 <sup>A</sup>	368.04 <sup>A</sup>
75/25	43.56 <sup>A</sup>	5.32 <sup>A</sup>	273.46 <sup>A</sup>
0/100	45.85 <sup>A</sup>	5.21 <sup>A</sup>	363.48 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 38. Variables de calidad del fruto de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	Diámetro ecuatorial (mm)	Grados Brix %	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
100/0	43.68 <sup>A</sup>	5.30 <sup>A</sup>	423.73 <sup>A</sup>
95/5	46.51 <sup>A</sup>	5.28 <sup>A</sup>	339.11 <sup>AB</sup>
90/10	42.16 <sup>A</sup>	5.51 <sup>A</sup>	408.69 <sup>A</sup>
85/15	44.50 <sup>A</sup>	5.79 <sup>A</sup>	418.28 <sup>A</sup>
80/20	45.23 <sup>A</sup>	5.19 <sup>A</sup>	368.04 <sup>AB</sup>
75/25	43.56 <sup>A</sup>	5.32 <sup>A</sup>	273.46 <sup>B</sup>
0/100	45.85 <sup>A</sup>	5.21 <sup>A</sup>	363.48 <sup>AB</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

**pH y Conductividad eléctrica:** Se encontraron diferencias significativas en los promedios de pH con las dos pruebas estadísticas realizadas, sin embargo, en las mediciones puntuales sólo se detectaron diferencias con la prueba de Fisher (Tablas

39 y 40). Estas diferencias puntuales están más relacionadas con variaciones en la humedad del sustrato, la mineralización de materia orgánica y la absorción de nutrientes por las plantas, que con un efecto por las fuentes de fertilización.

El pH del suelo se mantuvo estable durante el ciclo de cultivo de jitomate, con valores entre 6.1 y 7.1 (Figura 38A), indicando una estabilidad del pH en el suelo durante todo el ciclo del cultivo, asegurando la disponibilidad de nutrientes en el suelo y su asimilación por las plantas. Entre los 28 y 42 ddt, el pH presentó valores homogéneos en todos los tratamientos, con pequeñas variaciones en el tratamiento 3 (línea azul) alcanzando valores de 7.0. En los 56 y 84 ddt, los tratamientos 7 (línea roja) y 5 (línea verde) mostraron ligeras disminuciones llegando a valores de 6.1 y 6.3 respectivamente. Finalmente, el pH se recupera hacia valores cercanos a 6.8 entre los 98 y 105 ddt, reflejando un restablecimiento del equilibrio químico del suelo.

Tabla 39. pH en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	98	105	PROMEDIO
días después del trasplante													
100/0	6.7 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.7 AB
95/5	6.9 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.7 AB
90/10	7.0 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 A
85/15	6.8 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	7.1 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 AB
80/20	6.8 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.7 AB
75/25	6.7 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 B
0/100	6.8 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.1 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.7 AB

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 40. pH en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	98	105	PROMEDIO
días después del trasplante													
100/0	6.7 <sup>B</sup>	6.6 <sup>AB</sup>	6.8 <sup>B</sup>	6.7 <sup>AB</sup>	6.7 <sup>AB</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.8 <sup>AB</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.5 <sup>AB</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.7 <sup>AB</sup>
95/5	6.9 <sup>AB</sup>	6.6 <sup>AB</sup>	6.9 <sup>AB</sup>	6.9 <sup>AB</sup>	6.7 <sup>AB</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.9 <sup>AB</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.5 <sup>AB</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.7 <sup>AB</sup>
90/10	7.0 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	7.0 <sup>AB</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.6 <sup>AB</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>
85/15	6.8 <sup>AB</sup>	6.7 <sup>AB</sup>	7.1 <sup>A</sup>	6.8 <sup>AB</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.4 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>AB</sup>
80/20	6.8 <sup>AB</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.9 <sup>AB</sup>	6.7 <sup>AB</sup>	6.5 <sup>B</sup>	6.5 <sup>A</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>AB</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.7 <sup>AB</sup>
75/25	6.7 <sup>B</sup>	6.5 <sup>B</sup>	7.0 <sup>A</sup>	6.6 <sup>B</sup>	6.6 <sup>AB</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>AB</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.3 <sup>A</sup>	6.4 <sup>B</sup>	6.7 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>B</sup>
0/100	6.8 <sup>AB</sup>	6.8 <sup>AB</sup>	7.0 <sup>AB</sup>	6.6 <sup>B</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.5 <sup>A</sup>	6.6 <sup>B</sup>	6.9 <sup>A</sup>	6.1 <sup>A</sup>	6.3 <sup>B</sup>	6.6 <sup>A</sup>	6.8 <sup>A</sup>	6.7 <sup>AB</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

La conductividad eléctrica del suelo no mostró diferencias estadísticas significativas en los promedios generales ni en las mediciones puntuales con la prueba de Tukey (Tabla 41); sin embargo, al realizar la prueba estadística de Fisher, se encontraron efectos significativos a los 98 ddt (Tabla 42). Los tratamientos 2 (0.411 dS/m) y 6 resultaron con un valor significativamente menor de conductividad eléctrica en comparación con el tratamiento 5 (0.574 dS/m); por lo que la fertilización con la relación 95/5 podría estar asociada con una menor acumulación de sales en ese momento específico.

Tabla 41. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

TRATAMIENTO	77	91	98	105	PROMEDIO
	días después del trasplante				
<b>100/0</b>	0.27 <sup>A</sup>	0.25 <sup>A</sup>	0.42 <sup>A</sup>	0.29 <sup>A</sup>	0.3190 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	0.30 <sup>A</sup>	0.26 <sup>A</sup>	0.41 <sup>A</sup>	0.29 <sup>A</sup>	0.3290 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	0.21 <sup>A</sup>	0.24 <sup>A</sup>	0.46 <sup>A</sup>	0.34 <sup>A</sup>	0.3095 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	0.24 <sup>A</sup>	0.22 <sup>A</sup>	0.41 <sup>A</sup>	0.35 <sup>A</sup>	0.2952 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	0.35 <sup>A</sup>	0.30 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>	0.29 <sup>A</sup>	0.3955 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	0.29 <sup>A</sup>	0.25 <sup>A</sup>	0.38 <sup>A</sup>	0.31 <sup>A</sup>	0.3095 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	0.31 <sup>A</sup>	0.31 <sup>A</sup>	0.43 <sup>A</sup>	0.30 <sup>A</sup>	0.3533 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

Tabla 42. Conductividad eléctrica (dS/m) en suelo del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	77	91	98	105	PROMEDIO
	<b>días después del trasplante</b>				
<b>100/0</b>	0.27 <sup>A</sup>	0.25 <sup>A</sup>	0.42 <sup>AB</sup>	0.29 <sup>A</sup>	0.3190 <sup>A</sup>
<b>95/5</b>	0.30 <sup>A</sup>	0.26 <sup>A</sup>	0.41 <sup>B</sup>	0.29 <sup>A</sup>	0.3290 <sup>A</sup>
<b>90/10</b>	0.21 <sup>A</sup>	0.24 <sup>A</sup>	0.46 <sup>AB</sup>	0.34 <sup>A</sup>	0.3095 <sup>A</sup>
<b>85/15</b>	0.24 <sup>A</sup>	0.22 <sup>A</sup>	0.41 <sup>AB</sup>	0.35 <sup>A</sup>	0.2952 <sup>A</sup>
<b>80/20</b>	0.35 <sup>A</sup>	0.30 <sup>A</sup>	0.57 <sup>A</sup>	0.29 <sup>A</sup>	0.3955 <sup>A</sup>
<b>75/25</b>	0.29 <sup>A</sup>	0.25 <sup>A</sup>	0.38 <sup>B</sup>	0.31 <sup>A</sup>	0.3095 <sup>A</sup>
<b>0/100</b>	0.31 <sup>A</sup>	0.31 <sup>A</sup>	0.43 <sup>AB</sup>	0.30 <sup>A</sup>	0.3533 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD,  $p \leq 0.05$ ),  $n=7$

En la figura 38B se observa que los valores se mantuvieron entre 0.21 y 0.57 dS/m, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, estos valores descartan una posible acumulación de sales. Entre los 77 y 91 ddt la conductividad eléctrica se mantiene relativamente baja y estable en todos los tratamientos, lo que conlleva a una concentración reducida en sales solubles en esa fase del ciclo de cultivo.

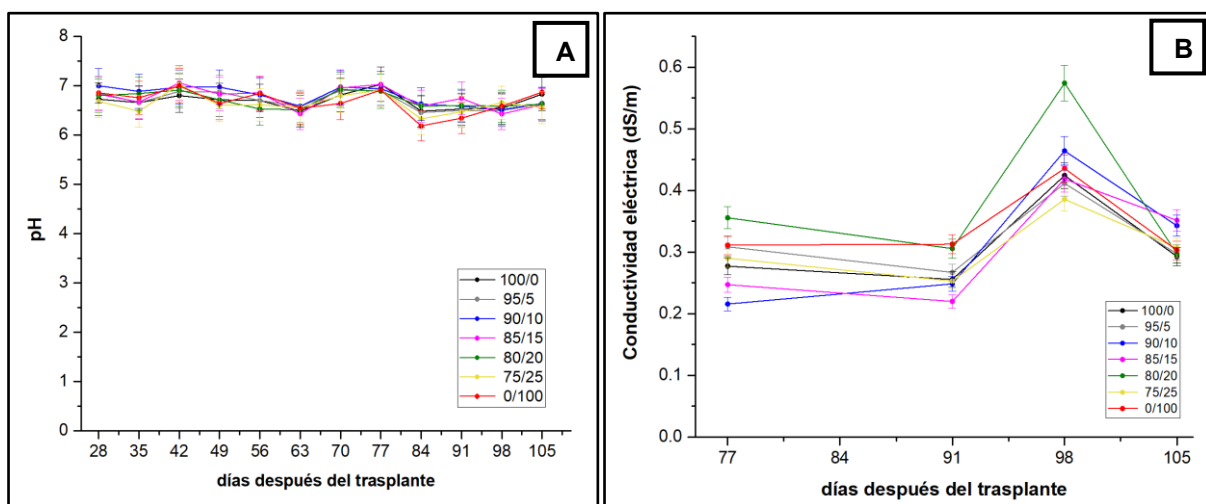


Figura 38. pH (A) y conductividad eléctrica (B) del cultivo de jitomate a diferentes esquemas de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad. Las barras de error muestran la desviación estándar de la media.

A los 98 ddt se detectó un incremento pronunciado en todos los tratamientos alcanzando los valores más altos, particularmente el tratamiento 5 (80/20) con el máximo pico, señalado con la línea verde y el tratamiento 6(75/25), señalado con la línea amarilla, con el menor. Ese momento coincide con el llenado y maduración de los frutos, fase de alta demanda nutricional en el jitomate. Además, en ese momento, la mayor mineralización de la materia orgánica y la aplicación de fertilizante mineral probablemente aumentaron la concentración de iones en el suelo. Posteriormente, al final del ciclo, la conductividad eléctrica desciende nuevamente en todos los tratamientos a niveles similares a los iniciales; mostrando evidencia de una redistribución de sales o lavado proveniente del riego.

De acuerdo con las pruebas estadísticas realizadas a los parámetros físicos y químicos del suelo (Tablas 43 y 44), la conductividad eléctrica, la materia orgánica y el contenido de nitratos fueron las variables que mostraron diferencias significativas. En el pH y la densidad aparente no se encontraron diferencias estadísticas significativas.

La densidad aparente del suelo se mantuvo relativamente constante independientemente del tipo de fertilización aplicada, en comparación con su valor inicial (1.02 g/cm<sup>3</sup>), se observó un ligero incremento en todos los tratamientos; lo que podría atribuirse a la compactación natural generada por el manejo del cultivo.

Con respecto al pH, se detectó una disminución general respecto al valor inicial (7.91), indicando una ligera acidificación del suelo, posiblemente por la liberación de protones derivada de la mineralización de la materia orgánica y la absorción de cationes por el cultivo. El tratamiento 6(75/25) mostró la mayor reducción (7.35), y a medida que disminuyó la proporción de fertilización mineral, el pH se redujo.

La conductividad eléctrica más alta la presentó el tratamiento 1 (100/0) y la más baja el tratamiento 2 (95/5). En todos los tratamientos la conductividad eléctrica final es considerablemente menor a su valor inicial (1.6 dS/m), planteando un beneficio para el cultivo al minimizar el riesgo de estrés salino.

En la materia orgánica, en comparación con su valor inicial (5.3%), todos los tratamientos muestran incrementos, especialmente el tratamiento 3 (90/10) con un 9.04% y el tratamiento 2 (95/5) con un 8.93%. Esto evidencia el aporte de la fuente

orgánica y las raíces del cultivo, favoreciendo la estructura del suelo, la retención de humedad y la actividad microbiana.

El contenido de nitratos, al final del cultivo, estuvo en un rango de 203.33 y 483.33 ppm, siendo el tratamiento 100% orgánico el que presentó el valor más alto y el tratamiento 5 (80/20) el más bajo. Comparado con el valor inicial (222.4 ppm), se observa que algunos tratamientos redujeron el contenido final, mientras que otros lo incrementaron notablemente. Un exceso de nitratos residuales implica un riesgo alto de lixiviación y contaminación del agua.

Tabla 43. Variables de parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de medias por Tukey.

<b>Tratamiento</b>	<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	<b>Materia orgánica (%)</b>	<b>Contenido de nitratos NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ppm)</b>
<b>100/0</b>	1.32 <sup>A</sup>	7.49 <sup>A</sup>	0.96 <sup>A</sup>	8.54 <sup>AB</sup>	230.00 <sup>BC</sup>
<b>95/5</b>	1.14 <sup>A</sup>	7.43 <sup>A</sup>	0.64 <sup>D</sup>	8.93 <sup>A</sup>	283.33 <sup>BC</sup>
<b>90/10</b>	1.16 <sup>A</sup>	7.41 <sup>A</sup>	0.79 <sup>B</sup>	9.04 <sup>A</sup>	326.67 <sup>B</sup>
<b>85/15</b>	1.31 <sup>A</sup>	7.37 <sup>A</sup>	0.78 <sup>B</sup>	6.70 <sup>C</sup>	253.33 <sup>BC</sup>
<b>80/20</b>	1.55 <sup>A</sup>	7.46 <sup>A</sup>	0.81 <sup>B</sup>	7.12 <sup>BC</sup>	203.33 <sup>C</sup>
<b>75/25</b>	1.34 <sup>A</sup>	7.35 <sup>A</sup>	0.75 <sup>BC</sup>	5.77 <sup>C</sup>	300.00 <sup>BC</sup>
<b>0/100</b>	1.41 <sup>A</sup>	7.43 <sup>A</sup>	0.68 <sup>CD</sup>	6.46 <sup>C</sup>	483.33 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ),  $n=3$

Tabla 44. Variables de parámetros físicos y químicos del suelo al final del cultivo de jitomate a diferentes dosis y fuentes de fertilización bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad, mediante la prueba de sensibilidad de medias de Fisher.

TRATAMIENTO	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	pH	Conductividad eléctrica (dS/m)	Materia orgánica (%)	Contenido de nitratos NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
<b>100/0</b>	1.32 <sup>A</sup>	7.49 <sup>A</sup>	0.96 <sup>A</sup>	8.54 <sup>A</sup>	230.00 <sup>CD</sup>
<b>95/5</b>	1.14 <sup>A</sup>	7.43 <sup>A</sup>	0.64 <sup>C</sup>	8.93 <sup>A</sup>	283.33 <sup>BC</sup>
<b>90/10</b>	1.16 <sup>A</sup>	7.41 <sup>A</sup>	0.79 <sup>B</sup>	9.04 <sup>A</sup>	326.67 <sup>B</sup>
<b>85/15</b>	1.31 <sup>A</sup>	7.37 <sup>A</sup>	0.78 <sup>B</sup>	6.70 <sup>BC</sup>	253.33 <sup>BCD</sup>
<b>80/20</b>	1.55 <sup>A</sup>	7.46 <sup>A</sup>	0.81 <sup>B</sup>	7.12 <sup>B</sup>	203.33 <sup>D</sup>
<b>75/25</b>	1.34 <sup>A</sup>	7.35 <sup>A</sup>	0.75 <sup>B</sup>	5.77 <sup>C</sup>	300.00 <sup>BC</sup>
<b>0/100</b>	1.41 <sup>A</sup>	7.43 <sup>A</sup>	0.68 <sup>C</sup>	6.46 <sup>BC</sup>	483.33 <sup>A</sup>

\*Literales distintas en columnas indican diferencias significativas (LSD, p≤0.05), n=3

Los resultados del análisis de contrastes ortogonales se presentan en la tabla 45, los cuales indican que el contenido de clorofila fue la variable fisiológica más afectada en el cultivo de jitomate, presentando diferencias significativas en las comparaciones entre fertilización mineral, orgánica y mixta; lo que confirma la influencia del tipo de fertilizante en esta variable. La conductancia estomática mostró sensibilidad únicamente en la comparación directa entre los tratamientos mineral y orgánico. El contenido de nitratos fue significativamente modificado al comparar la fertilización orgánica con la mixta. Estos resultados sugieren que, aunque la fertilización mineral y mixta pueden modificar ciertas variables fisiológicas de la planta, la eficiencia fotosintética se mantiene constante, al igual que el pH y la conductividad eléctrica.

Tabla 45. Contrastes ortogonales realizados para evaluar el efecto de los tratamientos sobre diferentes variables en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero de plástico tipo túnel sin control de temperatura y humedad.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
	Mineral	Mineral	Orgánica	Mineral
	vs	vs	vs	por
	Orgánica	Mixta	Mixta	Orgánica
	Valor p			
<b>Contenido de clorofila</b>	<b>0.0021</b>	0.2088	<b>0.0062</b>	<b>0.0095</b>
<b>Conductancia estomática</b>	0.1116	0.3532	0.2597	<b>0.0169</b>
<b>Eficiencia fotosintética</b>	0.5335	0.9796	0.4069	0.3288
<b>Contenido de nitratos</b>	0.8331	0.0803	<b>0.0437</b>	0.6489
<b>pH</b>	0.8249	0.4617	0.3071	0.1848
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.4757	0.6112	0.6798	0.3958

\*  $p \leq 0.05$  indica diferencias significativas

\* Los valores significativos se destacan en negritas

## 2.4 Conclusiones

La sustitución parcial de fertilizantes minerales por fuentes orgánicas influyó significativamente en el desempeño fisiológico, productivo y en las propiedades del sustrato utilizado del cultivo de jitomate. Sin embargo, la fuente y la proporción de fertilización ejercen un efecto marcado sobre el contenido de nitratos en el suelo y en los tejidos de la planta, particularmente en etapas de alta demanda nutricional como floración, cuajado y desarrollo del fruto.

Los tratamientos con mayor proporción de fertilización mineral elevaron el contenido de clorofila, el contenido de nitratos en planta, el contenido de nitratos en fruto y el número de frutos. Además, tendieron a elevar la conductividad eléctrica, lo que puede implicar riesgos de salinización en manejos intensivos.

Los tratamientos con mayor proporción orgánica favorecieron un mayor peso de fruto y una menor acumulación de nitratos en fruto sin afectar los grados brix. El aporte de fertilización orgánica incrementó la materia orgánica del suelo al final del ciclo de cultivo y contribuyó a la estabilidad del pH; aunque también provocó una mayor concentración de nitratos en suelo.

El tratamiento con 80 % de fertilización mineral y 20 % orgánica permitió obtener rendimientos similares al manejo totalmente mineral, con mejor calidad de fruto y condiciones edáficas más equilibradas.

En el cultivo de jitomate indeterminado en condiciones de invernadero, la sustitución parcial de fertilización mineral por orgánica se presenta como una alternativa agronómica viable y ambientalmente sustentable, al mejorar parámetros físicos y químicos del suelo sin afectar los rendimientos, calidad del fruto ni contenido de nitratos. Es deseable seguir investigando sobre las proporciones más adecuadas.

## 2.5 Literatura citada

Abbaszadeh, M., Salari, A., Maroosi, A., & Jamali, B. (2023). Evaluation of nitrate levels in tomatoes collected from leading production regions of Khorasan Razavi province, Iran. *Journal of Applied Horticulture*, 25(2), 216–218. <https://doi.org/10.37855/jah.2023.v25i02.38>

Abreu, E., Araujo, E., Rodríguez, S., Valdivia, A., Fuentes, L. & Pérez, Y. (2018). Efecto de la aplicación combinada de fertilizante químico y humus de lombriz en *Capsicum annum*. 445(1), 52-61.

Acatrinei, L. (2010). Photosynthesis rate, transpiration and stomatal conductance of vegetable species in protected organic crops.

Agromena, O. M. F. (2023). Caracterización física y química del abono órgano mineral Agromena-G. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 32(3).

Aguilar, G., Peña, C., Castro, R., Lara, J., Cruz, E., & Rojas, A. (2017). Efecto del vermicompost y estrés hídrico en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.): *Parámetros productivos y relaciones hídricas*. 86, 28-39.

Andraski, T. W., Bundy, L. G., & Brye, K. R. (2000). *Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching* (Vol. 29, No. 4, pp. 1095-1103). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

Añez, B., & Espinoza, W. (2003). Respuestas de la lechuga y del repollo a la fertilización química y orgánica. *Revista Forest. Venez*, 47(2), 73-82.

Arias, M. E., González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., & Ball, A. S. (2005). Soil health: A new challenge for microbiologists and chemists. *International microbiology*, 8(1), 13-21.

Arthanari, M. & Dhanapalan, S. (2019). A survey of tomato blossom and flower drop to the influence of environmental phenomena (*Solanum lycopersicum* L.). *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 3(1), 12-15.

Ávila, J. A. (2001). El mercado de los fertilizantes en México/situación actual y perspectivas. *Problemas del desarrollo*, 189-207.

Azcón Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal* (Segunda). Mc GrawHill.

Blanco, P. (2019). Aplicación de diferentes dosis de humus de lombriz en el cultivo de tomate (*Lycopersicum esculentum* miller) variedad cherry en ambientes atemperados en el municipio de El Alto. *Apthapi*, 5(1), 1390-1406.

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias agrícolas*, 33(2), 117-124.

Burbano Orjuela, H. (2017). La calidad y salud del suelo influyen sobre la naturaleza y la sociedad. *Tendencias*, 18(1), 118-126.

Calzada, J. (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. En *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. SAGARPA. Recuperado 4 de marzo de 2025, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>

Cardelli, R., Becagli, M., Marchini, F., & Saviozzi, A. (2017). *Effect of Biochar, Green Compost, and Vermicompost on the Quality of a Calcareous Soil: A 1-Year Laboratory Experiment*. 182(7), 1-8.

Cárdenas-Navarro, R., Sánchez-Yáñez, J. M., Farías-Rodríguez, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2004). Los aportes de nitrógeno en la agricultura. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 10(2), 173-178.

Castellanos, J. (2009). Manual de Producción de Tomate en Invernadero. Ed. Intagri. México. 369 p.

Callata, P. D. B. (2019). Aplicación de diferentes dosis de humus de lombriz en el cultivo de tomate (*Lycopersicum esculentum* miller) variedad cherry en ambientes atemperados en el municipio de El Alto. *Apthapi*, 5(1), 1390-1406.

Cepeda, J. (2016). *Química de suelos* (2.<sup>a</sup> ed.). Trillas.

Cerón Rincón, L. E., & Ancízar Aristizábal Gutiérrez, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.

Cuadrado, L., López, E., Bojacá, C. & Almanza, P. (2014). Influencia del nitrógeno en la producción del tomate (*Lycopersicum esculentum* L) sembrado en sustrato en Sutamarchán (Boyacá). *Ciencia y Agricultura*, 11(1), 85-90.

Cun, R., Duarte, C., & Montero, L. (2008). Producción orgánica de tomate mediante la aplicación de humus de lombriz y EcoMic® en condiciones de casa de cultivo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3), 22-25.

Daza, M., Díaz, J., Aguirre, E., & Urrutia, N. (2015). Efecto de abonos de liberación lenta en la lixiviación de nitratos y nutrición nitrogenada en estevia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(1), 112-123. <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3750>

Daza, M., Escobar, S., & Urrutia, N. (2018). Evaluación de dosis nitrogenadas en albahaca y su efecto en la lixiviación de nitratos. *Suelos Ecuatoriales*, 48, 50-56. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=783152>

Diario Oficial de la Unión Europea (2011). Contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios. No 1881/2006. *Official Journal of the European Union* 320:15-17.

Dimas, N., Ríos, P., Viramontes, U., Gil, A., Chávez, E., Reyna, V. & Reséndez, A. (2008). Producción de tomate en invernadero con humus de lombriz como sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3), 265-272.

Domínguez, J., Lazcano, C., & Gómez-Brandón, M. (2010). Influencia del vermicompost en el crecimiento de las plantas: Aportes para la elaboración de un concepto objetivo. *Acta zoológica mexicana*, 26(SPE2), 359-371.

Doran, J., & Parkin, T. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21.

Ehlig, C. & Hagemann, R.W. (1982). Nitrogen management for irrigated annual ryegrass in Southwestern United States. *Agron. J.* 74: 820-823.

Etchevers, J., Saynes, V., Sánchez, M. & Roosevelt, F. (2016). Manejo sustentable del suelo para la producción agrícola. *Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México. Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduados. México. pp*, 63-79.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005).

Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana escala 1:250 000. (2002). En *Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales*.

Follett, R. & Hatfield, J. (2001). Nitrogen in the environment: sources, problems, and management. *The Scientific World Journal*, 1, 920.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2023). *Anuario estadístico de agricultura y alimento mundial 2023*. Roma: FAO statistics. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e04f2b4-82fc-4740-8cd5-9b66f5335239/content>

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2023). *FAOSTAT*. Roma. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>

Fornaris, G. (2007). Conjunto tecnológico para la producción de tomate: cosecha y manejo postcosecha. *Estación experimental agrícola*, (166), 1-16.

Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M., Cape, J., Reis, S., Sheppard, L., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., & Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions Of The Royal Society*, 368(1621), 1-13. <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstb.2013.0164>

Galloway, J., Townsend, A., Erisman, J., Bekunda, M., Freney, J., Martinelli, L., Seitzinger, S., & Sutton, M. (2008). *Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions*. 320, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>

García, J., Troyo, E., Murillo, B., Flores, A., & González, A. (2001). Efecto de algunos insecticidas y un promotor de crecimiento sobre variables fisiológicas y el rendimiento de tomate *Lycopersicon esculentum* L. cv. Río Grande. *AGROQUIMICA-PISA*, 45(5/6), 189-198.

García, P., Marotta, L., Ruano, J. & Nogales, M. (2010). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Parte I. s.l.:Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

García, L. (2017). El ciclo global del nitrógeno. Una visión para el ecólogo terrestre. *Ecosistemas*, 26(1). <https://10.7818/ECOS.2017.26-1.02>

García, J., Robles, C. & Castillo, N. (2023). Contaminación por nitratos en verduras y frutas del mercado 27 de febrero de la ciudad de Macas-Ecuador. *Polo del Conocimiento*, 8(8), 1754-1765.

Glover, J., Cox, C., & Reganold, J. (2007). Future farming: a return to roots. *Scientific american*, 297(2), 82-89.

Harris, D. R., & Fuller, D. Q. (2014). Agriculture: definition and overview. *Encyclopedia of global archaeology*, 104-113.

Hedlund, J., Longo, S. B., & York, R. (2020). Agriculture, pesticide use, and economic development: a global examination (1990–2014). *Rural sociology*, 85(2), 519-544.

Herencia, J. F., Ruiz, J. C., Melero, S., Galavís, P. G., & Maqueda, C. (2008). A short-term comparison of organic v. conventional agriculture in a silty loam soil using two organic amendments. *The Journal of Agricultural Science*, 146(6), 677-687.

<https://doi.org/10.1017/S0021859608008071>.

Hernández, O., Ojeda, D., López, J. & Arras, A. (2010). Abonos orgánicos y su efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo: Effect of organic fertilizer on physical, chemical and biological soil properties. *Tecnociencia Chihuahua*, 4(1), 1-6.

Hernández Rodríguez, O. A., Rivera Figueroa, C. H., Díaz Ávila, E. E., Ojeda Barrios, D. L., & Guerrero Prieto, V. M. (2017). Plant and livestock waste compost compared with inorganic fertilizer: nutrient contribution to soil. *Terra latinoamericana*, 35(4), 321-328.

Hernández-Terrón, J. J., Gutiérrez-Rodríguez, F., Serrato-Cuevas, R., González-Huerta, A., & García-Rodríguez, E. (2021). Manejo nutricional integrado: herramienta clave para la agricultura sostenible. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 885-897.

Intagri. (2017). La Calidad e inocuidad en el cultivo de tomate. Serie hortalizas. Núm. 11. Artículos técnicos de INTAGRI. México. 4p.

Jamali, H., Quayle, W. & Baldock, J. (2015). Reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching losses from irrigated arable cropping in Australia through optimized irrigation scheduling. *Agr. Forest Meteorol.* 208, 32-39. Doi: 10.1016/j.agrformet.2015.04.010

Jasso, C., Martínez, M., Chávez, J., Ramírez, J., & Garza, E. (2012). *Guía para cultivar jitomate en condiciones de malla sombra en San Luis Potosí*. SAGARPA.

Jiménez, J. Y. (1989). Análisis de suelos y su interpretación. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*, 49, 75-89.

Kirkby, E., Le Bot, J., Adamowicz, S., Römheld, V. Nitrogen in physiology. An agronomic perspective and implications for the use of different nitrogen forms. *IFS Conference, International Fertiliser Society (IFS)*. Cambridge, United Kingdom. 46 p.

Kolbe, H., Jäckel, U., Schuster, M. (1999). Development of the nutrient contents and pH-value in the depth profile of test areas during the course of conversion to organic agriculture. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* 40:145-151.

Lassaletta, L., Aguilera, E., Blas, A., & Sanz, A. (2019). Los impactos ambientales de los sistemas de producción de alimentos. *Dossiers Economistas sin Fronteras: El futuro de la alimentación en el mundo*, (33), 24-29.

Leyva, G., Sánchez, P., Alcántar, G., Valenzuela, J., Gavi, F. & Martínez, A. (2005). Contenido de nitratos en extractos celulares de pecíolos y frutos de tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(2), 145-145.

Ley de conservación y restauración de suelos (1999).

Leyva, G., Sánchez, P., Alcántar, G., Valenzuela, J., Gavi, F. & Martínez, A. (2005). Contenido de nitratos en extractos celulares de pecíolos y frutos de tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana*.

Macías, A., Franco, R., Spínola, A., Mendoza, M. & Espinoza, G. (2010). Estudio sobre el requerimiento interno de nitrógeno en lechuga (*Lactuca sativa*). *Sociedades rurales, producción y medio ambiente*, (19), 83-100.

Martínez, J., Estrada, A., Rubin, E. & Cepeda, R. (2001). Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra latinoamericana*, 19(4), 293-299.

Mayz-Figueroa, J. (2004). Fijación biológica de nitrógeno. *Revista Científica UDO Agrícola*, 4(1), 1-20.

Molina, E. (2007). Análisis de suelos y su interpretación. *San José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International*.

Moreno, D., Campos, D. & Cisneros, R. (2004). Estadística Climatológica del Observatorio Meteorológico de San Luis Potosí (1877-2000) (Primera). Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Narváez, L., Cáceres, R., Marfà, O. & Cabrils, C. (2008). Pérdidas de nitrógeno por lixiviación en un cultivo en contenedor y al exterior de *Viburnum tinus* usando diferentes estrategias de fertilización.

Nemeskéri, E. & Helyes, L. (2019). Physiological responses of selected vegetable crop species to water stress. *Agronomy*, 9(8), 447.

Ollúa, R., Logegaray, V. & Chiesa, A. (2016). Concentración de nitratos en dos tipos comerciales de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas con distintas fuentes nitrogenadas. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences, ex Agro-Ciencia*, 32(3), 94-101. <https://doi.org/10.4067/S0719-38822016000300005>

Organización de las naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, (2021).

Ortuzar, M. A., Aizpurua, A., Castellón, A., Alonso, A., & Estavillo, J. M. (2003). Evolución del contenido de nitrato y amonio en lixiviados bajo diferentes formas de fertilización nitrogenada en trigo. *Investigación de la zona no saturada*, 6, 39-44.

Peralta, I., Knapp, S., & Spooner, D. (2006). Nomenclature for wild and cultivated tomatoes. *Tomato genetics cooperative report*, 56(1), 6-12.

Pérez, M. & Castro, R. (2011). *Jitomate en invernadero* (1.<sup>a</sup> ed.). Universidad Autónoma Chapingo.

Pérez, F., Arévalo, M., Pérez, L., Lobato, R., & Ramírez, M. (2020). Crecimiento y características postcosecha de frutos de genotipos nativos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista fitotecnia mexicana*, 43(1), 89-99.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117-1123.

Piñeiro, G., Pinto, P., Berensteher, P., Della, T., & Villarino, S. (2021). La salud del suelo y la sustentabilidad de los agroecosistemas. *MDA*, 2(2). [https://www.gba.gob.ar/desarrollo\\_agrario/revista\\_mda](https://www.gba.gob.ar/desarrollo_agrario/revista_mda)

Pratt, L., & Ortega, J. M. (2019). Agricultura protegida en México. *Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado*, 1-57.

Preciado, P., Fortis, M., García, J., Rueda, E., Esparza, J., Lara, A., Segura, M. & Orozco, J. (2011). Evaluación de soluciones nutritivas orgánicas en la producción de tomate en invernadero. *Interciencia*, 36(9), 689–693.

Polo, R. (2022). “Biofertilizantes” una revisión sistemática de la literatura científica en los últimos 10 años. *High Tech-Engineering Journal*, 2(1), 90-97.

Raffo, A., Salucci, M., Azzini, E., Bertone, A., Quaglia, G. B., Fogliano, V., & La Malfa, G. (2002). Nutritional characteristics of greenhouse cherry tomatoes. In *VI International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climate: Product and Process Innovation 614* (pp. 681-686).

Rangel, P., Hernández, M., García, J., Puente, E., Rivera, J., Herrera, A. & Vidal, J. (2011). Evaluación de soluciones nutritivas orgánicas en la producción de tomate en invernadero. *Interciencia*, 36(9), 689-693.

Rao, E. & Puttanna, K. (2000). Nitrates, agriculture and environment. *Current Science*, 79(9), 1163-1168.

Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F. & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), eadh2458.

Rivera, L., Benavides, A., Robledo, A., & González, S. (2023). La salud del suelo y el uso de bioestimulantes. *Agraria*, 20(3). <https://doi.org/10.59741/agraria.v20i3.46>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. & Foley, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).

Rodríguez, N., Cano, P., Figueroa, U., Favela, E., Moreno, A., Márquez, C., Ochoa, E., & Preciado, P. (2009). *Uso de abonos orgánicos en la producción de tomate en invernadero*. 27(4), 319-327.

Rodríguez-Ortiz, J. C., Díaz-Flores, P. E., Zavala-Sierra, D., Preciado-Rangel, P., Rodríguez-Fuentes, H., Estrada-González, A. J., & Carballo-Méndez, F. J. (2022). Organic vs. conventional fertilization: Soil nutrient availability, production, and quality of tomato fruit. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(3), 87.

Rupp, H., Tauchnitz, N., & Meissner, R. (2024). The influence of increasing mineral fertilizer application on nitrogen leaching of arable land and grassland—results of a long-term lysimeter study. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1345073.

Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). *Manual de producción de lechuga*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Sahu, H., Kumar, U., Mariappan, S., Mishra, A. P., & Kumar, S. (2024). Impact of organic and inorganic farming on soil quality and crop productivity for agricultural fields: A comparative assessment. *Environmental Challenges*, 15, 100903.

Salehzadeh, H., Maleki, A., Rezaee, R., Shahmoradi, B., & Ponnet, K. (2020). The nitrate content of fresh and cooked vegetables and their health-related risks. *PloS one*, 15(1), e0227551.

Salgado, S. & Núñez, R. (2010). *Manejo de fertilizantes Químicos y Orgánicos* (Primera). bba.

Sánchez, C. (2024). *Beneficios de la asociación de cultivos hortícolas para reducir insumos y mejorar la productividad y salud del suelo* [Tesis]. Universidad Politécnica de Cartagena.

Sancllemente, M. A., & Peña, E. J. (2008). Crecimiento y eficiencia fotosintética de *Ludwigia decurrens* Walter (Onagraceae) bajo diferentes concentraciones de nitrógeno. *Acta biológica colombiana*, 13(1), 175-186.

Savci, S. (2012). Investigation of effect of chemical fertilizers on environment. *Apcbee Procedia*, 1, 287-292.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2013). Paquete tecnológico de agricultura protegida para el cultivo de: jitomate en Invernadero. En *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. INIFAP.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2023). *Panorama agroalimentario 2023. México.*

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2023). *Hablemos de la agricultura en México.*

Secretaría de Salud (SSA) (2010). NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Ciudad de México, México.

SEMARNAT. NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. 2002.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020). *Lechuga.*

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020). *Tomate rojo.*

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). *Panorama agroalimentario 2023.*

Shewangizaw, B., Kassie, K., Assefa, S., Lemma, G., Gete, Y., Getu, D. & Manaze, G. (2024). Tomato yield, and water use efficiency as affected by nitrogen rate and irrigation regime in the central low lands of Ethiopia. *Scientific Reports*, 14(1), 13307.

Sutton, M. A., Erisman, J. W., Dentener, F., & Möller, D. (2008). Ammonia in the environment: From ancient times to the present. *Environmental Pollution*, 156(3), 583-604.

Taiz, L. (2013). Agriculture, plant physiology, and human population growth: past, present, and future. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 25, 167-181.

Tahat, M., Alananbeh, M., Othman, K. & Leskovar, I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859.

Terradas, Jaume. (2009). *Los límites planetarios*. 89, 8-19.

Udvardi, M., Below, F. E., Castellano, M. J., Eagle, A. J., Giller, K. E., Ladha, J. K. & Peters, J. W. (2021). A research road map for responsible use of agricultural nitrogen. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 660155.

Urrieta, J., Rodríguez, M., Ramírez, P., Baca, G., Ruiz, L., & Cueto, J. (2012). Variables de producción y calidad de tres selecciones de jitomate de costilla (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 18(3), 371-381.

Vázquez A. y Ramírez R. (2020). Producción orgánica de plántulas de jitomate. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Zacatepec. Zacatepec, Morelos, México. Folleto técnico No. 113. 17 p.

Vázquez A., Ramírez R., & Ocampo E. (2022). Producción de jitomate orgánico bajo cubierta. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Zacatepec. Zacatepec, Morelos, México. Folleto técnico No.118. 77 p.

Wall, L. (2021). La agricultura en tiempos de los microbiomas. *MDA*, 2(2). [https://www.gba.gob.ar/desarrollo\\_agrario/revista\\_mda](https://www.gba.gob.ar/desarrollo_agrario/revista_mda)

Wang, Z. & Li, S. (2019). Nitrate N loss by leaching and surface runoff in agricultural land: A global issue (a review). *Advances in agronomy*, 156, 159-217.

Welty, N., Radovich, C., Meulia, T. & Van Der Knaap, E. (2007). Inflorescence development in two tomato species. *Botany*, 85(1), 111-118.

Yearbook, F. S. (2023). World food and agriculture. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 15.*

## Conclusiones generales

El análisis conjunto de los resultados obtenidos en los cultivos de lechuga y jitomate bajo condiciones de invernadero permitió comprender de manera integral el impacto de las diferentes proporciones de fertilización mineral y orgánica sobre variables fisiológicas, variables fisicoquímicas del suelo, variables de rendimiento y variables de calidad. En ambos cultivos, la fuente y proporción de nutrientes influyó directamente en el contenido de nitratos, evidenciando que la fertilización mineral tiende a incrementar significativamente su concentración en los tejidos vegetales, mientras que el uso de fuentes orgánicas, como el humus de lombriz, favorece una liberación más gradual del nitrógeno, reduciendo los riesgos de acumulaciones excesivas; aunque en este trabajo no se evidenció una tendencia. El uso de fertilización orgánica mejoró la estructura del suelo e incrementó la materia orgánica, aunque su aporte de nutrientes es más lento y requiere una planificación precisa para satisfacer las demandas del cultivo en las etapas críticas de desarrollo.

Adicionalmente, el manejo del invernadero tiene un papel preponderante en el comportamiento de las variables evaluadas. El uso de materiales como plásticos de cubierta, cintillas de riego y macetas individuales para cada planta permitió mantener las condiciones básicas de cultivo y un suministro de agua y nutrientes. Sin embargo, la ausencia de un control de temperatura y de humedad generó variaciones que pudieron influir en el metabolismo de las plantas, particularmente en la fotosíntesis y la conductancia estomática. Estas limitaciones de control ambiental pudieron acentuar los efectos de los tratamientos de fertilización, especialmente bajo condiciones de estrés térmico o hídrico.

Si bien se observaron beneficios parciales en la mejora de ciertas propiedades del suelo y en la liberación más gradual de nitrógeno con la fertilización orgánica, los resultados no mostraron reducciones consistentes en los contenidos de nitratos ni una ausencia de impacto sobre el rendimiento en todos los casos.

La integración de estrategias de fertilización que combinen de manera equilibrada fuentes orgánicas y minerales, junto con un manejo más eficiente de condiciones ambientales mediante infraestructura adecuada, representa una alternativa viable para optimizar el rendimiento y la calidad en el cultivo de hortalizas en invernadero.

Al promover prácticas agrícolas más sostenibles que mantienen el rendimiento de los cultivos, analizar el contenido de nitratos en fruto, estudiar la dinámica del nitrógeno en el suelo e identificar prácticas que reducen la contaminación del agua, hacer uso eficiente y racional de insumos agrícolas y buscar alternativas para disminuir el uso de fertilizantes minerales y sus emisiones; este proyecto de tesis se vincula con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 como lo son el 3 (Salud y bienestar), 6 (Agua limpia y saneamiento) y 12 (Producción y consumo responsables).